

dottoranda
EMANUELA LANZARA
tutor
prof. arch. **MARA CAPONE**
cotutor
arch. **AMLETO PICERNO CERASO**

PANELING COMPLEX SURFACES

RAZIONALIZZAZIONE DI SUPERFICI COMPLESSE PER L'INDUSTRIALIZZAZIONE

D II - DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II - DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
BIENTE DOTTORATO DI RICERCA IN TECNOLOGIA DELL'ARCHITETTURA E RILIEVO E RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCHITETTURA E DELL'AMBIENTE DOTTORATO DI RICERCA IN TECNOLOGIA DELL'ARCHITETTURA E RILIEVO E RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCHITETTURA E DELL'AMBIENTE

La natura di una superficie dipende strettamente dalle mutue relazioni esistenti tra le parti che la compongono. Essa rappresenta un supporto attraverso il quale la complessità può manifestarsi ed è, al tempo stesso, luogo di sperimentazione per rispondere in maniera prestante ed espressiva alle sfide architettonico-ambientali. L’obiettivo della presente ricerca è lo studio teorico-applicativo delle tecniche di *paneling* di superfici architettoniche complesse. Dalla tradizione all’innovazione, da sempre lo scopo è quello di individuare in fase progettuale le geometrie guida necessarie per tradurre le impronte digitali in elementi tangibili e riconoscibili nelle opere costruite. Il principale contributo risiede nella ricerca e nella dimostrazione del legame esistente tra la curvatura delle superfici e le tecniche di razionalizzazione che mirano ad ottimizzarne la fattibilità. L’ottimizzazione costruttiva, economica ed estetica del processi finalizzati alla realizzazione delle forme complesse genera la creazione di approcci di tipo integrato e multidisciplinare, favorendo lo sviluppo di nuove competenze da parte delle figure coinvolte nel processo.

dottoranda
EMANUELA LANZARA
tutor
prof. arch. **MARA CAPONE**
cotutor
arch. **AMLETO PICERNO CERASO**

PANELING COMPLEX SURFACES

RAZIONALIZZAZIONE DI SUPERFICI COMPLESSE PER L'INDUSTRIALIZZAZIONE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II - DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA

DOTTORATO DI RICERCA IN
TECNOLOGIA DELL'ARCHITETTURA E RILIEVO E RAPPRESENTAZIONE DELL'ARCHITETTURA E DELL'AMBIENTE

Università degli Studi di Napoli Federico II

Dottorato di Ricerca
in **Tecnologia dell’Architettura e Rilievo e Rappresentazione dell’Architettura e dell’Ambiente**
ciclo XXVII

Coordinatore del Dottorato di Ricerca

Mario Losasso

Coordinatore dell’indirizzo in Rilievo e Rappresentazione dell’Architettura e dell’Ambiente

Riccardo Florio

Collegio dei docenti

Paola Ascione	Valeria D’Ambrosio
Erminia Attaianese	Antonella di Luggo
Laura Bellia	Antonella Falotico
Mariangela Bellomo	Riccardo Florio
Jean François Cabestan	Dora Francese
Massimiliano Campi	Mario Losasso
Mara Capone	Francesco Maglioccola
Raffaele Catuogno	Alessandra Pagliano
Umberto Caturano	Antonio Passaro
Alessandro Claudi de St. Mihiel	Sergio Pone
Claudio Claudi de St. Mihiel	Marina Rigillo
Alberto Coppola	Sergio Russo Ermolli

Tutor

Mara Capone

Co-tutor

Amleto Picerno Ceraso

A Domenico

Ringraziamenti

Ringrazio tutta la commissione per avermi accompagnato in questi anni ed in particolare la prof.ssa Mara Capone per la passione trasmessami; ringrazio Amleto per la disponibilità, per l’opportunità di crescita offertami e per avermi sostenuto durante questo percorso; ringrazio l’arch. Alain Moatti (*Moatti - Rivière architectes*) per l’accoglienza rivoltami in occasione del nostro incontro a Parigi e per il materiale e le informazioni fornitemi; Niccolò Baldassini (RFR | Paris) per la disponibilità dimostrata e il gruppo Evolute, in particolare Alexander Schiftner, per il supporto offerto; ringrazio mia madre, mio padre e mia sorella, Domenico, tutti i miei amici e Pasquale; ringrazio tanti che nemmeno sanno o immaginano quanto mi hanno aiutato.

Premessa	p. 11
----------	-------

PARTE PRIMA

INTRODUZIONE E ANALISI CRITICA

CAPITOLO PRIMO

Architectural Surfaces

1.1	La superficie: un supporto per la complessità	19
1.1.1	Speculazione: virtuale <i>vs</i> reale	20
1.1.2	Interazione: acquisizione e prestazione	24
1.1.3	Iconicità: evocazione e narrazione	26
1.2	La superficie come sistema: implosione ed esplosione	29

CAPITOLO SECONDO

Keywords

2.1	Forma complessa: il problema	39
2.2	Discretizzazione: il mezzo	41
2.3	Ottimizzazione: il processo	42
2.4	Industrializzazione: l'obiettivo	45

CAPITOLO TERZO

Research in Architectural Geometry

3.1	La figura dell'architetto: un approccio olistico	53
3.2	L' <i>Architectural Geometry</i> : un settore multidisciplinare	58
3.2.1	<i>Topic: Paneling Architectural Free Form Surfaces</i>	60
3.3	Il controllo della forma: gli strumenti computazionali	63

PARTE SECONDA

INDAGINE E SISTEMATIZZAZIONE: DAI PRINCIPI ALLE TECNICHE

CAPITOLO QUARTO

Paneling & Digital Fabrication

4.1	Sistemi regolari <i>vs</i> sistemi casuali: ordine e caos	75
4.2	<i>Paneling</i> alla piccola, media e grande scala	78
4.3	Analisi di un campione: schede e grafici riassuntivi	79
4.4	Sistemi portati <i>vs</i> sistemi autoportanti	81
4.5	Sistemi discreti - semi discreti/misti - continui: <i>in medio stat virtus?</i>	83
4.6	I materiali e le tecniche di fabbricazione	87
4.7	Riflessioni e risposte: <i>in medio stat virtus</i>	96
4.8	Oltre l’architettura: ambiti di sperimentazione	103

CAPITOLO QUINTO

I principi geometrici

5.1	La rivelazione delle superfici	115
	5.1.1 Esperimenti di sensibilizzazione	116
	5.1.2 Gli strumenti diagnostici: dal dato al <i>pattern</i>	120
5.2	Cenni di Geometria Differenziale: la curvatura delle superfici	124
5.3	Classificazione e discretizzazione	139

CAPITOLO SESTO

Complex surfaces: pattern & optimized paneling

6.1	Le tre tassellazioni regolari: i pattern “funzionali”	151
6.2	I sistemi discreti: distribuzione e ottimizzazione di pannelli piani	158
	6.2.1 Pattern triangolare	171
	6.2.2 Pattern esagonale	179
	6.2.3 Pattern quadrangolare	186
6.3	Le <i>Offset mesh</i>	197
6.4	Dai modelli semi-discreti ai sistemi “misti”: pannelli curvi	199

PARTE TERZA

APPLICAZIONI, SPERIMENTAZIONI E PROPOSTE

CAPITOLO SETTIMO

Caso studio.

Le facciate degli *Eiffel Tower Pavilions*

7.1	Gli <i>Eiffel Tower Pavilions</i> : introduzione	217
7.2	L’evoluzione del primo piano della <i>Torre Eiffel</i>	219
7.3	Il progetto: un contesto “magnetico”	224
7.4	La forma delle facciate: ottimizzazione e razionalizzazione	226
7.5	<i>Panel Fitting</i> : la soluzione finale	232
7.6	La sottostruttura	234
7.7	La fabbricazione e il montaggio	236

CAPITOLO OTTAVO

Caso applicativo.

I *Cocoon Pavilions*: un sistema autoportante

8.1	I <i>Cocoon Pavilions</i> : introduzione	241
8.2	Il <i>Cocoon Temporary Pavilion</i> : il prototipo	243
	8.2.1 La ricerca della forma	244
	8.2.2 La Discretizzazione: <i>hexagonal paneling</i>	247
	8.2.3 Il <i>Gravity test</i> : un sistema instabile	251
	8.2.4 La fabbricazione: tecnologia e materiale	253
	8.2.5 Il montaggio	255
8.3	Il <i>Cocoon Evo Pavilion</i> : l’evoluzione	261
	8.3.1 La ricerca della forma	261
	8.3.2 La Discretizzazione: <i>hexagonal paneling</i>	263
	8.3.3 Il <i>Gravity test</i> : un sistema autoportante	263
	8.3.4 La fabbricazione: tecnologia e materiale	266
	8.3.5 Il montaggio	266

CAPITOLO NONO

Sperimentazioni e proposte

9.1	Osservazioni	275
9.2	<i>Digital Form Finding & Paneling</i>	277
	9.2.1 Membrane & <i>hexagonal paneling</i>	280
	9.2.2 Membrane, catenarie e superfici a curvatura negativa/nulla	287
9.3	<i>Offset mesh</i> : verso un approccio stereotomico	290

Bibliografia

Una forma complessa può coincidere, o meno, con una o più superfici complesse. Una superficie complessa, invece, coinciderà sempre con una forma complessa.

Rispetto al punto o alla linea, la superficie rappresenta un ente geometrico la cui natura dipende strettamente dalle mutue relazioni esistenti tra le parti che la compongono. Questa interpretazione rende la superficie un supporto ottimale attraverso il quale la complessità può manifestarsi, fornendo delle possibili risposte ai problemi che essa stessa, in quanto tale, pone allo scopo di rispondere in maniera prestante ed espressiva alle sfide architettonico-ambientali.

Nella sua totalità, la complessità delle forme dell'architettura contemporanea può essere indagata e interpretata da diversi punti di vista, concettuale, spaziale e tecnologico.

Tra teoria e prassi, l'obiettivo della presente ricerca è lo studio teorico-applicativo delle tecniche di *paneling* di superfici complesse.

L'ambito di studio all'interno del quale questo studio si colloca è il settore multidisciplinare dell'*Architectural Geometry*.

Il termine *rationalization* (razionalizzazione) è utilizzato dai *geometry experts* impegnati in tali studi per considerare tanto i processi di *optimized paneling* che mirano alla discretizzazione di una superficie complessa (scomposizione in facce piane), tanto quelli che mirano alla genesi di modelli semi-discreti (scomposizione in elementi svilup-pabili derivanti dall'ulteriore suddivisione di sistemi discreti) e misti (scomposizione di una superficie complessa in porzioni di superficie

a singola e a doppia curvatura).

Dunque, è chiaramente evidente che la Geometria da sempre rappresenta la chiave di lettura, nonché il principale strumento analitico-attuativo, attraverso cui è possibile controllare l'intero processo di produzione architettonica, a partire dalla fase creativa, fino a raggiungere quella costruttiva.

In particolare, nell'ambito della realizzazione di architetture di forma complessa, l'obiettivo principale risiede nell'indagine e nella sperimentazione di quei processi che consentono di raggiungere e di ottimizzare costruttivamente, esteticamente ed economicamente l'opera, mirando, soprattutto per le opere riferite alla grande scala architettonica, all'industrializzazione del processo.

Alla luce di tale esigenza, ottimizzare significa anche incoraggiare la creazione di processi integrati e multidisciplinari attraverso lo sviluppo di nuove competenze da parte delle figure coinvolte nel processo: lo scopo è favorire l'innovazione dei processi, congiungendo le conoscenze produttive, eventualmente derivanti da altri settori, con le necessità talvolta fortemente espressive del progetto.

Le forme complesse non rappresentano solo l'espressione di una nuova estetica, legata al particolare momento culturale e socio-economico generato dalla rivoluzione digitale, ma possono essere considerate il luogo per sperimentare e ottimizzare le soluzioni a cui la nuova coscienza ecologica mira per la realizzazione di un'architettura sostenibile. Grazie ai nuovi strumenti, gli architetti non progettano a priori la forma di un edificio, ma ricercano e manipolano una serie di dati, codificati come una sequenza di equazioni parametriche, al fine di generare una serie di possibili soluzioni progettuali mirate a fornire una risposta sostenibile alle differenti, nuove sfide ed esigenze. L'opportunità di manipolare l'oggetto architettonico attraverso la finestra virtuale del computer, consente di focalizzare l'attenzione sulle proprietà geometriche della forma e di ragionare attraverso figure e solidi elementari, alla ricerca di una possibile scomposizione e semplificazione della complessità.

La logica di aggregazione e le relazioni di interdipendenza degli elementi costituenti l'Architettura si riflettono nella complessità ed unicità della realtà compositiva e costruttiva. I prototipi, da sempre, rappresentano dunque il luogo virtuale in cui effettuare le operazioni geometriche necessarie a controllare e a garantire le interazioni tra i

vari elementi che compongono un oggetto.

“Qualsiasi tentativo di costruzione teorica nel nostro ambito deve, fin dall'inizio, assumere un ruolo ausiliario, una condizione secondaria subordinata alle opere [...] E' come la centina che rende possibile la costruzione dell'arco: una volta compiuta la sua missione, scompare e non rientra nella percezione che abbiamo dell'opera finita, ma sappiamo che è stato un passaggio obbligato e imprescindibile, un elemento necessario a erigere quello che ora vediamo e ammiriamo”.

(Martí Aris Carlos, 2007).

Nei secoli passati, come oggi, lo scopo della ricerca diviene, talvolta, quello di ribaltare l'oggetto dell'attività progettuale dall'opera stessa agli elementi necessari per realizzarne ogni singola parte.

Nel passaggio dalla tradizione all'innovazione, agendo sulle superfici mediante specifiche operazioni geometriche è possibile ricavare le tracce/profilo attraverso cui viene discretizzata la forma iniziale e vengono prodotti gli elementi necessari per la realizzazione del manufatto. Le superfici vengono realizzate ricucendo materialmente le singole porzioni o *patches* geometricamente definite mediante le operazioni di *paneling* del prototipo digitale.

Lo scopo di tale operazione è, in definitiva, quello di ricavare delle geometrie guida per la fabbricazione dei singoli elementi, traducendo così le impronte ricavate in ambito digitale in elementi tangibili e riconoscibili nelle opere costruite.

A tal proposito, il principale contributo di questo studio risiede nella ricerca e nella dimostrazione del legame esistente tra la curvatura delle superfici complesse e le tecniche di razionalizzazione che consentono di ottimizzarne la fattibilità. In conformità a tale ipotesi, si dimostra che l'analisi della curvatura gaussiana rappresenta uno strumento progettuale capace di veicolare e di ottimizzare l'intero processo di realizzazione di una superficie, dalla fase ideativa a quella costruttiva, in quanto inevitabilmente coinvolto nel processo e negli esiti che sottendono alla distribuzione dei *pattern* (reti di curve, tassellazioni, distribuzione di pannelli piani e curvi) necessari per approssimare e per raggiungere la non immediata realizzabilità fisica di un oggetto di forma complessa.

Coerentemente con le riflessioni elaborate, la struttura della tesi è composta da tre parti, ciascuna delle quali è divisa in tre capitoli.

La prima parte introduce e osserva, in maniera critica, il tema dell'uso della superficie in architettura, indagata in qualità di “supporto”

speculativo, interattivo ed iconico per la manifestazione di contenuti e di relazioni complesse, innate o indotte. Le fasi di discretizzazione, ottimizzazione e industrializzazione strutturano la sequenza di azioni necessarie per giungere alla realizzazione sostenibile di una forma complessa. L'attenzione è rivolta al ruolo, consapevole o meno, che la figura dell'architetto svolge all'interno del processo.

La seconda parte introduce e indaga il tema del *paneling* di superfici complesse. A supporto delle ipotesi avanzate è stato schedato un campione di superfici complesse pannellizzate e appartenenti alla media e grande scala architettonica; inoltre, sono stati indagati i materiali e le tecniche di *Digital Fabrication* che favoriscono l'industrializzazione del prodotto.

L'indagine affronta le modalità di razionalizzazione discreta (panelli piani), semi-discreta (panelli sviluppabili), e mista (panelli piani e curvi). Le superfici rigate, rappresentano, da sempre, la tipologia di forme più semplice da gestire: da riferimento morfologico diventano il mezzo attraverso cui scomporre, in parti più semplici ed economiche, la complessità delle forme libere.

Di conseguenza, il quinto capitolo può essere considerato una cerniera tra i quattro capitoli precedenti (introduzione e analisi) ed i quattro successivi (sistematizzazione e applicazione). Tale capitolo è dedicato all'indagine e alla classificazione differenziale delle superfici, finalizzata alla distribuzione ottimizzata dei *pattern* (triangolare, esagonale e quadrilatero) ritenuti "funzionali" alla sostenibilità del processo di discretizzazione di una superficie complessa. Le risposte geometrico compositive derivanti dall'applicazione delle tecniche di razionalizzazione, o *paneling*, sono state indagate all'interno del sesto capitolo.

La terza parte mostra l'applicazione dei contenuti teorici indagati attraverso la rappresentazione di un caso studio, le facciate a doppia curvatura degli *Eiffel Tower Pavilions* (panelli a singola curvatura, sistema portato) progettati da Moatti & Rivière Architectes e ingegnerizzati da RFR | Paris in collaborazione con Evolute GmbH.

Passando dalla fase teorico-applicativa a quella costruttivo-realizzativa, segue la presentazione delle due versioni di un caso studio applicativo, il *Cocoon Temporary Pavilion*, la cui indagine geometrica e realizzazione fisica sono state affrontate partecipando all'interno di un workshop (*gh_to_fabrication*, 13-16 maggio 2013, Cava de'Tirreni,

Salerno) promosso dal centro di ricerche *Medaarch – Mediterranean FabLab* e dal centro di ricerche *Co-de-iT*, e il *Cocoon Evo Pavilion*, (sistema discreto autoportante), il quale rappresenta l'evoluzione del primo prototipo e il cui studio è stato affrontato dai due centri di ricerca in continuità e a completamento dell'esperienza precedentemente affrontata.

In conclusione, all'interno dell'ultimo capitolo sono state condotte e sistematizzate una serie di sperimentazioni di *Digital form finding*, finalizzate alla ricerca e all'ottimizzazione delle condizioni geometriche che consentono di coniugare la natura formale delle superfici complesse con le tecniche di razionalizzazione e di pattern ritenuti più idonei.

Tra le proposte di ricerca futura è segnalata la possibilità di indagare le proprietà di *offset* di cui alcuni *pattern* sono dotati per studiarne le eventuali ricadute nell'ambito della *Digital Stereotomy*.

In conclusione, la presente ricerca, mira a contribuire agli studi finalizzati allo sviluppo di un approccio consapevole alle esigenze ed alle problematiche riferite all'uso delle superfici complesse in architettura e poste dalla sfide architettoniche contemporanee, allo scopo di ispirare delle nuove, possibili soluzioni future che inevitabilmente derivano dalla comprensione e comunicazione dei fenomeni reali e che sono finalizzate alla realizzazione fisica dell'architettura.

Nella seguente trattazione le immagini relative alle opere considerate sono inserite a bassa risoluzione o rielaborate nel rispetto dei diritti degli autori, trattandosi, la presente ricerca di un'opera ad uso scientifico non a scopo di lucro (ex articolo. 70 LdA). Si rimanda alla relativa bibliografia e alle Fonti delle immagini per una migliore consultazione delle stesse.

PARTE PRIMA

INTRODUZIONE E ANALISI CRITICA

Architectural Surfaces

Il caso ha delle regole che ancora non conosciamo.

Albert Einstein

1.1 La superficie: un “supporto” per la complessità

Una forma complessa può coincidere, o meno, con una o più superfici complesse. Una superficie complessa, invece, coinciderà sempre con una forma complessa. Rispetto al punto o alla linea, la superficie rappresenta un ente geometrico la cui natura dipende strettamente dalle mutue relazioni esistenti tra le parti che la compongono.

Questa interpretazione rende la superficie un supporto ottimale attraverso il quale la complessità può manifestarsi, fornendo delle possibili risposte ai problemi che essa stessa, in quanto tale, pone.

Come Aldo Aymonino afferma, “*Mentre il punto, la linea sono da considerare elementi distanti dal fare architettura, la superficie può invece essere considerata come del tutto dotata di un’identità architettonica [...] Ad un certo punto, il Moderno comincia a riconciliarsi con la superficie, staccandosi dall’ideologia del Primo Moderno che diffidava dalla superficie in quanto luogo della delittuosa decorazione. E’ in pieno International Style che la superficie si emancipa dalle sole sperimentazioni di tipo pittorico e decorativo, acquistando così finalmente corpo, grana e spessore.*”¹

Osservando attentamente diversi esempi di architetture antiche, moderne e contemporanee è dunque possibile concludere che lo spazio possa essere semplicemente delimitato da superfici.

Negli anni ’50, Reyner Banham², ipotizzava che gli spazi abitati dai primitivi fossero “non volumetrici”, ricorrendo, volta per volta, alla

realizzazione di accampamenti capaci di rispondere alle diverse esigenze. I sistemi che potremmo, quindi, definire privi di massa, come ad esempio le coperture, gli involucri o le facciate, si riferiscono, dunque, ai più antichi esempi di rami e di pelli intrecciati per la realizzazione delle costruzioni primitive. Alla luce delle profonde ed attente riflessioni elaborate da Branko Kolarevic, e pubblicate all'interno della sua celebre opera *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing* (2003),³ è pertanto interessante rintracciare le permanenze, o delineare le trasformazioni, che oggi è possibile individuare nell'ambito della realizzazione delle forme complesse rispetto ai contenuti e alle speculazioni teorizzate nei secoli precedenti. Gli scritti di teorici e studiosi, dal filosofo e matematico tedesco Wilhelm Leibniz al pensatore francese Gilles Deleuze⁴ hanno informato ed influenzato gli approcci contemporanei alla progettazione architettonica. In particolare, le teorie di Deleuze derivanti dallo studio del pensiero e dell'estetica barocca, introducono l'ambiguità spaziale e figurativa generata dalla "piega", ispirando la creazione di superfici architettoniche duttili e lisce e di spazi transitori, talvolta incompleti, ma capaci di fondere l'edificio con il sito nel quale esso stesso è inserito.⁴

Dal Crystal Palace di Joseph Paxton, a Gustave Eiffel e alla sua omonima Torre, gli esperimenti sviluppati nel corso del XX secolo hanno annunciato i sistemi complessi che caratterizzano parte dell'architettura contemporanea. Impossibile non citare il Guggenheim Museum di Frank Gehry a Bilbao, probabilmente l'esito più noto della rivoluzione digitale, le cui conseguenze favoriscono lo sviluppo di una vera e propria rivoluzione industriale che pervade il campo dell'edilizia. Questa ricerca è dunque ispirata dalle numerose riflessioni derivanti dall'osservazione dei fenomeni architettonico-spaziali che hanno modificato e che stanno modificando, in maniera radicale, quelli che da sempre rappresentano i concetti fondativi e strutturanti della disciplina architettonica.

1.1.1 Speculazione: virtuale vs reale

Dalla seconda metà del XX secolo, l'opera *Theory and Design in the First Age Machine* (1960)⁵ di Banham, ha contribuito a favorire le speculazioni formali di diversi gruppi, tra cui Archigram, Metabolism e Superstudio, scaturite in immagini di "città molli e di metafore robo-

tiche", di architetture scultoree, "non abitabili".

I materiali deformabili, come la plastica, hanno ispirato il trattamento gratuito e spesso sfrenato della forma, accogliendo superfici topologicamente complesse, come il toro, il nastro di Möbius e la bottiglia di Klein, in ambito architettonico.⁶

Tali posizioni sono state adottate con entusiasmo da una serie di architetti contemporanei d'avanguardia, autori di quelle architetture cosiddette "immateriali".⁷

Greg Lynn⁸ è stato uno dei primi architetti ad utilizzare i software di animazione non per rappresentare, ma per generare forme complesse e biomorfe: il tracciamento del segno è una conseguenza del moto e dell'azione della forza. Nelle sue speculazioni è, dunque, l'animazione che implica l'evoluzione della forma.

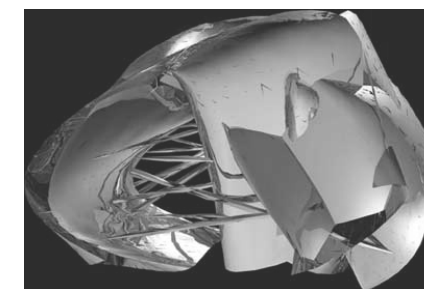
La teoria secondo la quale la forma e le sue trasformazioni rappresentano il prodotto dell'azione dinamica di forze, è stata adottata da Lynn direttamente dalle teorie pubblicate da D'Arcy Thompson nella sua opera *Crescita e forma* (1917)⁹, in cui questi sostiene che, in natura, la forma e le sue variazioni sono dovute all'azione di forze.

Marcos Novak,¹⁰ attraverso le sue esplorazioni algoritmiche, costruisce modelli matematici e procedure generative legate alla presenza di numerose variabili, preoccupandosi di manipolare le mutue relazioni tra le parti coinvolte, piuttosto che gli oggetti stessi.

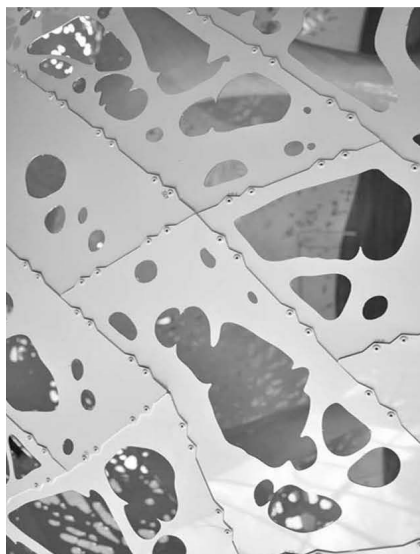
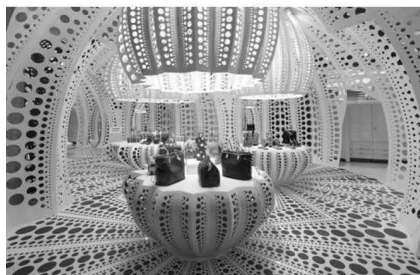
La continua mutabilità della forma comporta la ridefinizione del tempo come elemento attivo, dunque come parametro, del processo progettuale.¹¹

Attraverso un approccio di tipo parametrico, per generare la forma, è possibile sottoporre elementi geometrici semplici all'influenza di campi di forze: ne sono esempio gli esperimenti di torsione e flessione degli oggetti, dalla genesi e manipolazione di *Blobs* o di *metaballs* amorfi e mutuamente interagenti, e gli esperimenti di *digital form finding*, capaci di generare le forme in maniera "più oculata" rispetto alle tecniche precedentemente citate.

Grazie alla fusione tra le ricerche intraprese da diversi studiosi e designer contemporanei e le sperimentazioni, approximate soprattutto alla piccola e media scala, favorite dalle nuove tecnologie di *Digital Fabrication* attualmente disponibili, le speculazioni teorizzate acquisiscono oggi fisicità. L'obiettivo di queste ricerche è quello di sviluppare delle soluzioni ottimizzate dal punto di vista estetico, costruttivo ed economico per migliorare il rapporto tra il costruito e l'ambiente



1.1 - *Data Driven Forms*, M. Novak (1997-98)
1.2,3 - *Biological Habitat. Form*, Z.Oksiuta,
1.4 - *Ipsopycnic systems technology*, Z.Oksiuta,

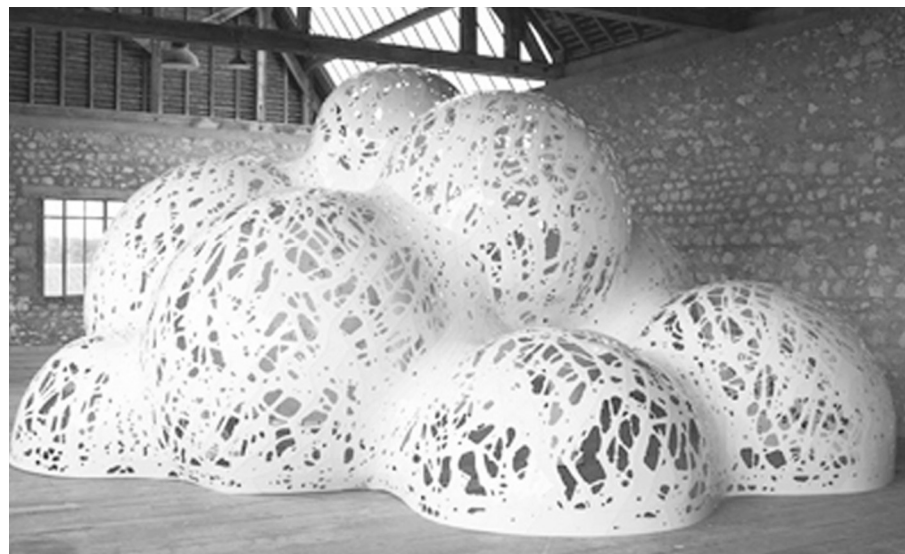


all'interno del quale esso si inserisce, traendo ispirazione dalla natura stessa e dall'applicazione dei principi che ne derivano per generare innovazione attraverso la creazione e il controllo di forme e di sistemi biomorfi.

Le “speculazioni” artistiche e architettoniche dell'architetto francese Marc Fornes, fondatore di *THEVERYMANY*TM (2011), centro di ricerca in Informatica e *Digital Fabrication* con sede a New York, rappresentano dei prototipi la cui natura altamente scultorea è attentamente calcolata dalle fasi iniziali di ricerca formale a quelle successive della produzione.¹² Le sue creazioni sono classificabili ed indagabili come “un qualcosa di a se stante”, e non sono da considerare come un ipotetico modello di riferimento né per il controllo di edifici di scala maggiore, né per quello di oggetti di dimensioni contenute.

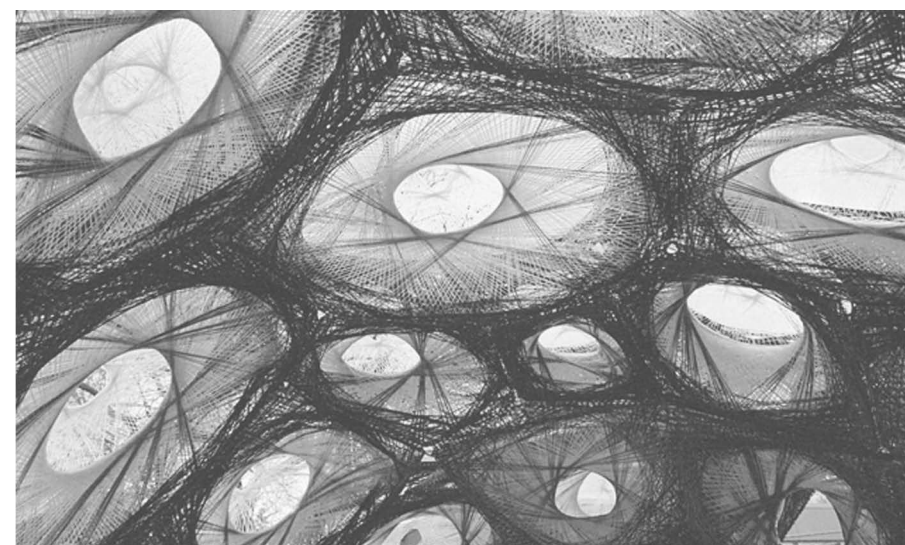
Il suo *pop up store di Louis Vuitton & Yayoi Kusama* è la prima struttura a guscio autoportante realizzata in fibra di carbonio. Nonostante la complessità delle forme generate, alcune tra le sue creazioni derivano dall'assemblaggio di un insieme di elementi sviluppabili, dunque “srotolabili”, ed in quanto tale morfologicamente ottimizzati.¹³

L'ICD/ITKE *Reserch Pavilion*, di cui Achim Menges¹⁴ (1975) è il responsabile, è un progetto di ricerca interdisciplinare rivolto allo sviluppo della possibile correlazione tra le strategie di progettazione biomimetica e i nuovi processi di produzione robotizzata. Nel novembre 2012, con il suo *team* di ricerca, Menges ha realizzato una serie di padiglioni mediante l'impiego di diverse tipologie di materiali,



tra cui il carbonio e la fibra di vetro. L'accoppiamento diretto tra la geometria e i sistemi computazionali ha permesso la genesi e l'analisi comparativa di numerose soluzioni mirate allo sviluppo di strutture altamente efficienti con il minimo uso di materiale.¹⁵

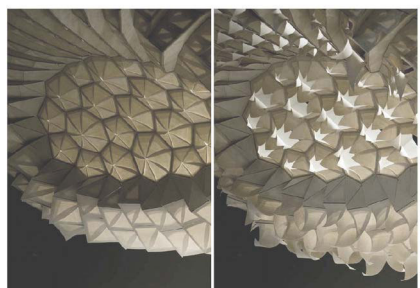
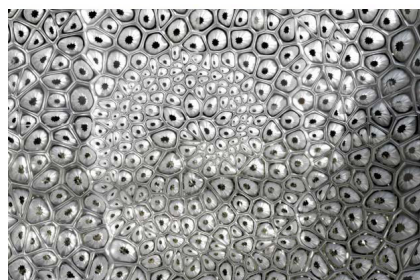
Neri Oxman,¹⁶ presso il *Mit Media Lab*, nel 2010 ha fondato il gruppo *Mediated Matter*, con il quale svolge un'intensa attività di ricerca nell'ambito della progettazione computazionale, della fabbricazione digitale, della scienza dei materiali e della biologia sintetica, finalizzata alla progettazione di oggetti e di sistemi dalla piccola alla grande scala. Oxman è autrice di numerosissimi progetti:



1.5 - *Pop up store di Louis Vuitton & Yayoi Kusama*, M. Fornes & *THE VERY MANY*, 2012
1.6 - *Labys Frisae- indoor pavilion*, M. Fornes & *THE VERY MANY*, 2013
1.7 - *Vaulted Willow*, M. Fornes & *THE VERY MANY*, 2014
1.8,9 - *DAW*, M. Fornes & *THE VERY MANY*

1.10,11 - *ICD/ITKER researchPavilion*, A.Menges, 2014
1.12 - *ICD/ITKE Research Pavilion*, A.Menges, 2011
1.13,14 - *ICD/ITKE Research Pavilion*, 2012





1.15 - *Cartesian Wax*, N. Oxman, 2007
1.16 - *Monocoque*, N. Oxman, 2007
1.17 - *Fibonacci Mashrabiya*, N. Oxman, 2009-11
1.18 - *Hygroscopic: metereosensitive morphology*, A. Menges, 2012
1.19,20 - *Hygroskyn: metereosensitive pavilion*, A. Menges, 2013.

Fibonacci's Mashrabiya (2009-2011) e *Cartesian Wax* (2007) sono due prototipi ispirati dai modelli geometrici presenti in natura (come ad esempio la serie di Fibonacci) e studiati per esplorare le capacità organizzative dei materiali “informati” grazie all’interazione con una serie di parametri ambientali. Lo scopo è, ad esempio, quello di generare la distribuzione di diversi *pattern* a seconda del microclima che si desidera ottenere per uno specifico contesto ambientale.¹⁷

Il progetto *Monocoque* (2007) (monoscocca) promuove la creazione di prototipi che sfruttano l’eterogeneità e la differenziazione delle proprietà dei materiali allo scopo di generare delle “pelli portanti”.¹⁸

1.1.3 Interazione: acquisizione e prestazione

Se, in passato, era consuetudine accusare di superficialità e casualità le attività puramente rivolte alla ricerca formale, oggi appare chiaro quanto i risultati che derivano da tale attività siano, al contrario, strettamente relazionati con l’ambiente circostante.

Grazie ai nuovi strumenti, gli architetti non progettano a priori la forma di un edificio o di un oggetto, ma ricercano e manipolano una serie di dati, o parametri, opportunamente codificati attraverso una sequenza di equazioni (parametriche), al fine di generare una serie di possibili soluzioni progettuali mirate a fornire una risposta sostenibile alle differenti sfide ed esigenze attuali e future, sperimentando le proprie conoscenze e abilità in svariati ambiti, professionali e di ricerca. Luigi Moretti, figura di spicco dell’architettura italiana del secondo Dopoguerra, attraverso le ricerche svolte in collaborazione con il matematico Bruno De Finetti, nel 1942 giunge a definire l’Architettura generata secondo tale approccio con il termine “*Architettura parametrica*”.¹⁹ I parametri e le loro interrelazioni, espresse attraverso formule matematiche, divengono così, in tutti i sensi, l’espressione di un nuovo linguaggio architettonico. Il disegno parametrico rifiuta, dunque, l’elaborazione di soluzioni predeterminate in favore dell’esplorazione delle potenzialità infinitamente variabili di un sistema.²⁰ Attraverso l’input di specifici parametri i progettisti possono generare molteplici geometrie a partire da uno schema articolato sulla base di specifiche relazioni.

La superficie rappresenta, a tal proposito, il luogo per eccellenza attraverso cui sperimentare soluzioni innovative. Secondo tale approc-

cio, una forma architettonica complessa non è dunque concepita come un’entità stazionaria, ma rappresenta un’entità mutevole che si evolve in modo plastico e dinamico grazie all’interazione con una serie di forze esterne. Questa è la ragione per la quale questi sistemi vengono definiti “responsivi”.

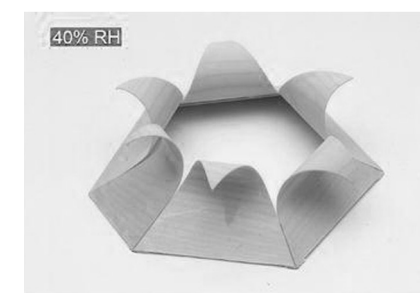
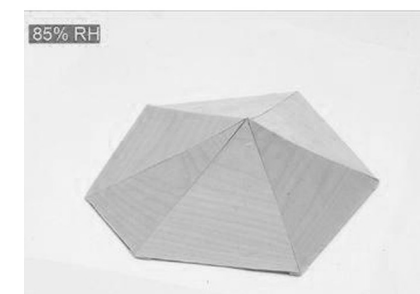
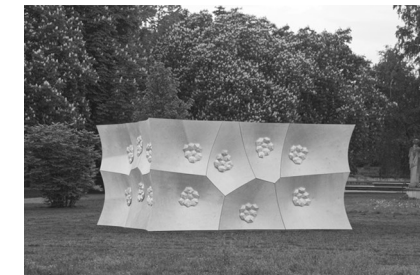
La lingua inglese designa genericamente con l’aggettivo “responsive” tutto ciò che “reagisce o risponde rapidamente e in modo appropriato ad uno stimolo”. In italiano l’aggettivo che rende al meglio tale termine è “adattivo”, cioè “capace di adattarsi” per soddisfare nuovi requisiti.²¹ Questi oggetti sono dotati di un’intelligenza digitale che consente loro di interagire con l’ambiente in cui sono inseriti o con le persone che li fruiscono.²²

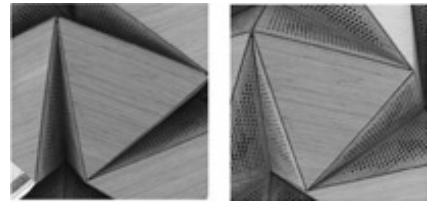
Più specificamente, il termine “architettura responsiva” nasce alla fine degli anni ’60, ad opera di Nicholas Negroponte, e viene utilizzato per descrivere quel tipo di architettura che ha la capacità di “riconfigurarsi” se stimolata dall’ambiente circostante.²³

Su tali considerazioni si fondano le ricerche sviluppate da Kas Oosterhuis: *[..] se gli edifici possono diventare attivi e se le loro azioni vengono connesse a un database, ecco allora che cominciano a sviluppare un sistema per agire autonomamente. Non dovranno più resistere a delle deformazioni ma si deformeranno in tempo reale per creare delle specifiche configurazioni, legate alle differenti specificità d’uso. [...] Ciò che facciamo come architetti è determinare l’ampiezza delle deformazioni. Non possiamo prestabilire alcuna configurazione specifica, né un suo contenuto fisico, così come in quello informativo [...] La reattività in tempo reale e la possibilità di riconfigurazione producono nuovi comportamenti all’interno dell’architettura. L’interazione tra utenti ed edificio si trasforma allora in un’esperienza dinamica attraverso interfacce trasparenti... [...]*²⁴

La computazione di sistemi cinetici e dinamici favorisce la genesi di architetture altamente tecnologiche.²⁵

Mentre i sistemi cinematici scambiano informazioni con l’ambiente circostante attraverso l’esecuzione di vere e proprie azioni, la simulazione dinamica considera gli effetti di forze esterne agenti sui sistemi stessi. La forza di gravità, il vento, l’azione del sole, gli esseri viventi rappresentano parte dei parametri di input utilizzabili per la genesi e per la manipolazione della forma dell’oggetto. Tali parametri, la cui azione può essere simulata dai nuovi strumenti digitali, vengono assorbiti dalle superfici, le quali assumono una specifica configurazione oppure si trasformano in sistemi attivi, “animati”.





1.21,22 - *Resonant Chamber*, RVTR, 2011.Particolari
1.23 - *Son-O-House*, Nox Architects, Breugel, 2004
1.24 - *Muscle NSA*, L. Di Carlo, 2003

Tra gli esempi di superfici-sistemi responsivi è possibile citare la nota facciata dell'*Institut du Monde Arabe* di Parigi di Jean Nouvel, il nuovo *Campus di Giustizia di Madrid* di Norman Foster, le creazioni del *Gruppo d'ECO* (Università di Stoccarda), la *Resonant Chamber*, del gruppo RVTR, le *Al Bahar Towers* progettate dal gruppo Aedas Architects, l'*Hygroscope meteorosensitive morphology*, l'*HigroSkin pavilion*, entrambi di Achim Menges, e il *Solar Shift*, di ProjectOne LLC.

Attualmente, grazie ai nuovi strumenti digitali, anche l'azione e il pensiero umano rappresentano dei possibili parametri attraverso cui informare una superficie.

La *D-tower*, dei Nox Architects, è un pezzo d'arte, commissionato dalla città di Doetinchem (Paesi Bassi) per "mappare" le emozioni degli abitanti: la scultura, cambiando colore, comunica i dati derivanti dalle risposte che i cittadini offrono ad una serie di domande.²⁶ *Son-O-House*, sempre dei Nox Architects, e *Muscle NSA2003*, di Luca Di Carlo, sono due esempi di prototipi completamente programmabili e capaci di cambiare forma: le mutazioni morfologiche sono generate dalla vicinanza o dal movimento delle persone.

1.1.2 Iconicità: evocazione e narrazione

In accordo con la teoria estetica dell'*Einfühlung*, che tanto ispirò il pensiero e l'opera di Henry Van de Velde, incentrata sulla ricerca e sull'espressione della *forma-forza*,²⁷ alcuni esempi contemporanei dimostrano che la superficie, in architettura, può essere considerata uno strumento "empatico", capace di assumere e comunicare diversi significati. La superficie, grazie alla sua duttilità, assume un carattere fortemente iconico ed in quanto tale può essere considerata come un vero e proprio mezzo di comunicazione.²⁸

Per definizione, l'aggettivo iconico richiama la capacità "di rappresentare per mezzo di immagini realistiche".²⁹

Come sinonimo di "figurativo" propone il notevole grado di rassomiglianza o di corrispondenza formale con l'oggetto rappresentativo.³⁰ Pertanto, la superficie rappresenta un supporto, un mezzo attraverso cui raccontare un contenuto. Essa assume dunque il ruolo di "significante", cioè di un sistema capace di esprimere un dato significativo. Alla luce di tali riflessioni, è assolutamente da sottolineare il potere onirico, simbolico e comunicativo³¹ di cui è dotata l'archi-

tettura contemporanea degli involucri, delle facciate e delle superfici decorate.

E' noto che le architetture di forma complessa sono spesso considerate estranee o inopportune per il contesto all'interno del quale sono inserite; tuttavia, esistono e dunque non possono essere ignorate.

"Sarà poi il giudizio critico della collettività a riconoscere o a negare tale (relativa) perfezione [...]"³²

Diversi esempi di architetture contemporanee si avvalgono di superfici capaci di evocare e di enfatizzare contenuti e significati: è interessante citarne alcuni.

Il *Nuovo Museo di Salvador Dalì*, realizzato a Saint Petersburg, in Florida, evoca lo *duro y lo blando* (il duro e il molle), due simboli ricorrenti nelle opere surrealiste dell'artista a cui l'opera stessa è dedicata.³³ La *Dancing House*, o *Casa danzante*, realizzata da Frank Gehry a Praga, è un complesso composto da due edifici affiancati molto diversi tra loro: una torre di vetro, dinamica, e un cilindro pieno, statico, rappresentano il vecchio ed il nuovo, la cui forma "a passo di danza" richiama le movenze di due ballerini, notoriamente individuati nelle figure di Ginger Roger e Fred Astaire, impegnati in una *performance*. L'opera rappresenta, a sua volta, un'icona della città di Praga.

La facciata ovest della nuova *Arena Corinthians* di San Paolo del Brasile, è una superficie curva e depressa, simulante la deformazione della rete al momento del *goal*.³⁴

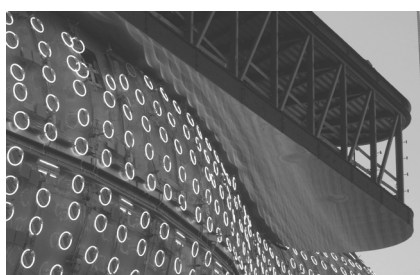
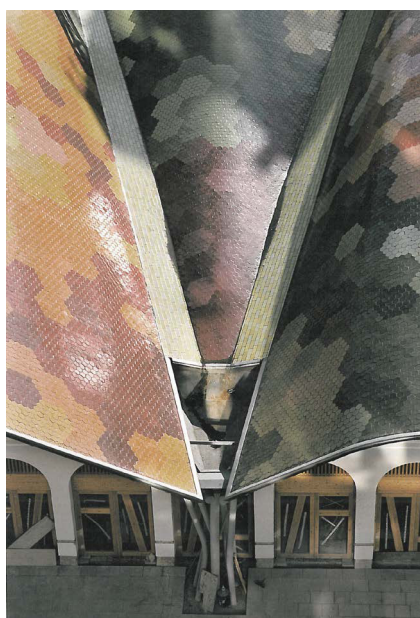
Il *Ponte della Pace*, progettato dall'architetto italiano Michele De Lucchi per la città di Tbilisi, capitale della Georgia, si trova sul fiume Mtkvari e connette il più antico quartiere di Bericoni con quello di Rikhe, oggetto di un recente piano di sistemazione di respiro internazionale. La superficie in vetro del ponte è una membrana composta da una struttura di tubi di acciaio e da elementi triangolari in vetro. La sua struttura a guscio, stabile per forma, incarna una nota icona cittadina. Nel punto in cui sorge il Ponte, il fiume divide il nucleo storico dalla nuova Tbilisi: il ponte diviene così un monumento al dialogo tra presente e passato, segno di riferimento e simbolo visivo per l'orientamento nella città.³⁵

Altri esempi di architetture, invece, dimostrano la predisposizione narrativa della superficie-supporto.

La ricerca dello studio EMBT da sempre si è concentrata sulle superfici, trattando queste ultime come il supporto su cui tracciare dei veri e propri racconti decorativi.



1.25 - *Nuovo Museo di Salvador Dalì*, Hok, 2011
1.26 - *Dancing House*, F.O.Gehry, V. Milunic, 1996
1.27 - La facciata ovest dell'*Arena Corinthians*, 2014
1.28 - Il *Ponte della pace*, Michele De Lucchi, 2011



1.29,30 - Mercado di Santa Caterina, EMBT, 2004
1.31,32 - Kunsthaus, Peter Cook & Colin Fournier, 2003

Nella ristrutturazione del *Mercato di Santa Caterina* a Barcellona, l'estradosso della copertura diventa una superficie pensile narrativa. Le maioliche colorate che rivestono la superficie richiamano il *Parco Guell* di Gaudì.

Altro celebre esempio di superficie “narrativa” è la *Kunsthaus* di Gratz, di Peter Cook & Colin Fournier, l'opera forse più nota della numerosa serie di sistemi progettati per comunicare mediante la semplice proiezione di immagini e di flussi di testo.³⁶

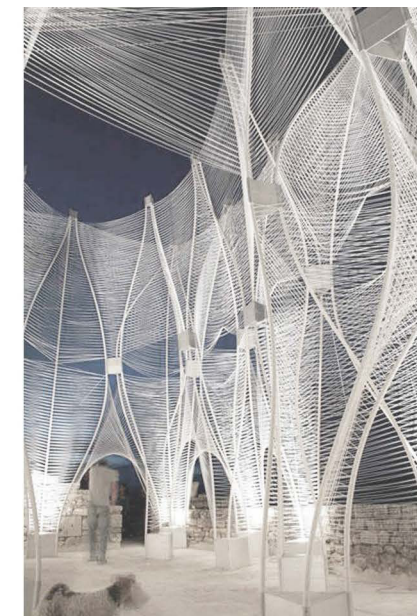
Alcune superfici, a differenza da quelle responsive, “subiscono” l'azione dell'ambiente circostante, i cui agenti trasformano solo temporaneamente il supporto appositamente predisposto allo scopo di favorire la rappresentazione di un dato fenomeno.

In questi casi, la superficie rappresenta un supporto che si potrebbe definire “passivo”, cioè non “informato”, capace di assumere un significato ma non di svolgere attivamente un'azione.

Windshape, il *land art project* disegnato dagli nArchitects insieme ad un gruppo di studenti, è stato concepito come un laboratorio sperimentale che ha permesso di testare l'idea di una struttura che risponde agli stimoli naturali. E' una struttura commissionata nel 2006 dal Savannah College of Art & Design (SCAD) e nasce come uno spazio per l'organizzazione di eventi a Lacoste, in Provenza. L'opera consiste in due alti padiglioni la cui forma muta dinamicamente sotto l'azione del vento. Una rete strutturale di tubolari bianchi in plastica, tenuti assieme da elementi in alluminio, sostiene 50 km di nastro bianco realizzato in polipropilene, tessuto fittamente per creare una superficie. Variando il grado di tensione dei nastri, il sistema risponde al vento in diversi modi, dalle oscillazioni ritmiche e ondulatorie delle superfici all'emissione di caratteristici sibili, assumendo diverse configurazioni.³⁷

Gli interventi di *Land Art*, a partire da frammenti di spazio di grandi dimensioni paesaggi artificiali, estrapolano dei nuovi paesaggi artificiali, concettuali, decontestualizzati.³⁸

Dal punto di vista comunicativo ed evocativo, la duttilità e al malleabilità, conferiscono alle superfici, letteralmente calate come un velo sul paesaggio esistente, un potere “dislocativo”, capace di “dislocare” lo spettatore, e provocando nuove suggestioni, percezioni e, dunque, una nuova, inedita interpretazione dei luoghi.

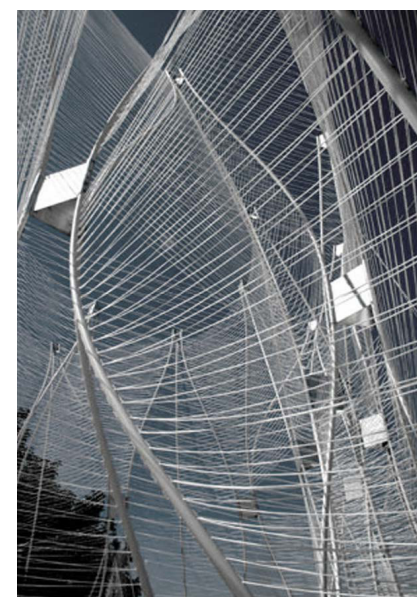


1.2 La superficie come “sistema”: implosione ed esplosione

Le molteplici riflessioni sopra riportate invitano a considerare la superficie come un efficace sistema di “supporto per la complessità”. Un sistema, per sua definizione, è costituito da più elementi interdipendenti, uniti tra loro in modo organico e tra i quali si stabiliscono dei rapporti fondati su specifici principi fondamentali, le cui regole possono essere interne o indotte.³⁹

In architettura, una superficie curva si mostra come un oggetto “tendenzialmente continuo”, dotato di maggiore o minore complessità geometrica. Le modalità di distribuzione degli elementi che la compongono, implicitamente distribuiti o esplicitamente visibili, comunicano in maniera più o meno efficace l'espressività della forma. Pertanto, nel caso delle superfici architettoniche strutturalmente e costruttivamente continue la scomposizione dell'unità esiste, ma è “implosa”.

Di contro, un sistema discreto o semi-discreto (Cfr. cap. III, par. 3.2.1) è composto da elementi chiaramente distinguibili: le parti di cui si compone sono tutte chiaramente identificabili, e la superficie complessa “esplode”: la continuità originaria si frammenta in un certo numero di parti chiaramente distinguibili. La configurazione esplosa assunta dal sistema-superficie descrive, in maniera più o



1.33, 34, 35 - Windshape, nArchitects, 2006

meno coerente, le relazioni interne che ne determinano la complessità, generando risultati esteticamente e costruttivamente più o meno armonici.

Alla luce di tali riflessioni si evince che, dal punto di vista topologico, un'architettura di superficie può assumere indifferentemente una forma curvilinea o sfaccettata: la differenza deriva dalle diverse circostanze culturali, tettoniche, morfologiche, materiali, economiche e ambientali che influenzano ed informano il progetto.

Il linguaggio di cui le forme complesse si avvalgono, in architettura come in altri ambiti, è spesso difficilmente comprensibile ed esplorabile: indipendentemente dal metodo di discretizzazione, la ricerca di coerenza tra le forme generate e quelle costruite rappresenta uno dei temi di indagine più attuali.

Pertanto, all'atto della progettazione e della costruzione, è importante sviscerare quei contenuti impliciti, ma necessari, per approcciare alla forma in maniera corretta e sostenibile: tale operazione rappresenta l'obiettivo di questo studio.

Alla luce delle riflessioni sopra riportate, parlare di architetture che si manifestano attraverso la fabbricazione e l'assemblaggio di parti che costituiscono un involucro, di una facciata, più in generale di una pelle, significa considerare tanto quei manufatti caratterizzati da una continuità di natura materica e strutturale, quanto quelli che necessitano, soprattutto in relazione alla scelta del tipo di materiale da impiegare per la loro realizzazione, di una frammentazione della continuità originaria, senza la quale sarebbe impossibile procedere alla loro realizzazione.

Gli architetti moderni, dagli anni '50 in poi, hanno mostrato una grande attrazione per gli esperimenti derivanti dal Costruttivismo: le loro sperimentazioni sono scaturite nella trasparenza e nella leggerezza del vetro e delle strutture composte da intelaiature leggere e nella computazione di solette continue e sottili, aprendo così la strada a due modi differenti di gestire il problema della fabbricazione delle superfici in architettura. La Geometria da sempre rappresenta la chiave di lettura, nonché il principale strumento analitico-attuativo, attraverso cui è possibile controllare l'intero processo di produzione architettonica, a partire dalla fase creativa, fino a raggiungere quella costruttiva. Essa è il principale strumento necessario per il controllo dell'invenzione ed in quanto tale è capace di trasformare

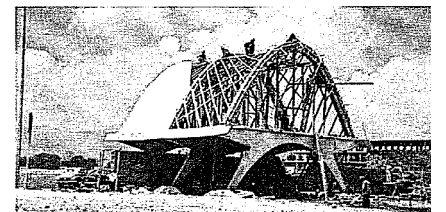
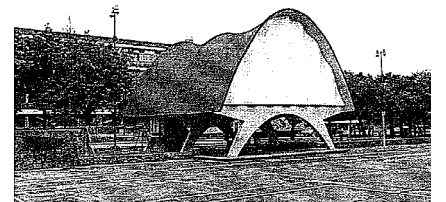
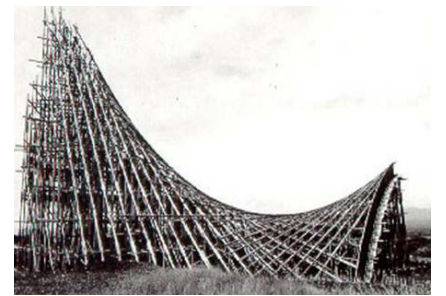
un'idea compositiva o una suggestione spaziale in un oggetto fisicamente esistente e funzionante.

La ricerca geometrico-spaziale e costruttivo-strutturale condotta sull'uso delle superfici in architettura rappresenta il filo conduttore che lega e confronta numerosi progetti, dal periodo moderno a quello contemporaneo. Le sperimentazioni perseguite dagli architetti e dagli ingegneri moderni hanno permesso di ricavare soluzioni formali capaci di rappresentare un'importante fonte di ispirazione per gli approcci contemporanei. Grazie alle potenzialità espressive del cemento armato è stato possibile sperimentare nuove tipologie strutturali e costruttive, resistenti, funzionanti, dotate di spessori molto contenuti e capaci di alleggerire il loro peso proprio. Tra le superfici dotate di maggiore espressività formale è possibile citare il paraboloide iperbolico, l'iperboloide iperbolico, i conoidi e le numerose soluzioni derivanti dalla combinazione ed intersezione di queste. I principi geometrici posti alla base della definizione formale di tali superfici, guidano il processo progettuale, e ottimizzando il comportamento strutturale e costruttivo delle nuove soluzioni formali. La genesi geometrica di queste tipologie di superfici consente di discretizzare la forma mediante schiere di elementi rettilinei. Queste superfici sono economiche sia in termini di tempi di realizzazione, che di costi di produzione: dal punto di vista strutturale, le generatrici rettilinee rappresentano le barre per l'armatura della soletta, mentre la doppia curvatura della forma garantisce un'alta resistenza dal punto di vista strutturale.⁴⁰

E' possibile individuare alcune tipologie ricorrenti di superfici ricavate dalla combinazione di porzioni di paraboloide iperbolico, talvolta caratterizzate dalle variazioni dalla geometria del quadrilatero sghembo su cui la genesi della superficie si imposta, dando vita ad una ricca varietà ed espressività dal punto di vista formale. Tale superficie può, infatti, essere suddivisa o tagliata senza generare problemi di efficienza dal punto di vista statico.

Particolarmente numerose sono le opere realizzate da Felix Candela, a cui seguono gli esempi di Santiago Calatrava, di Oscar Niemeyer o di Le Corbusier.⁴¹

Per queste architetture di superficie, ancora di più che per le strutture a guscio, è possibile sottolineare l'evidente coincidenza tra gli elementi lineari che compongono la struttura portante e la forma che



1.35 - *Capilla de Cuernavaca*, Felix Candela, 1958
1.36 - *Capilla de Cuernavaca*. Gli elementi che compongono la struttura sono distribuiti secondo l'andamento delle due schiere di generatrici rettilinee.
1.37,38 - *Padiglione per lo studio dei raggi cosmici*, Felix Candela, 1951

ne deriva. Un sistema di superfici “apparentemente” meno definito dal punto di vista geometrico è il *Padiglione Philips* di Le Corbusier, realizzato per l’esposizione di Bruxelles del 1958: la genesi delle superfici che ne definiscono la struttura non è immediatamente riconoscibile.

*“In questo caso, le potenzialità espressive della superficie sono utilizzate dal progettista per realizzare un vaso spaziale moderno, pluridirezionato, comunque basato sull’applicazione rigorosa dei principi geometrici”.*⁴²

La volontà di integrare e di potenziare la ricerca sull’uso delle superfici ha incoraggiato la fusione di ambiti disciplinari diversi, tra cui, in particolare, quello della matematica, allo scopo di sperimentare e di definire nuove soluzioni per l’architettura.

Tra la fine del XIX e gli inizi del XX secolo, le sperimentazioni condotte sull’uso del cemento armato per la realizzazione di grandi cupole aprono la strada alla progettazione di nuove forme.⁴³ Tra i progettisti impegnati nella progettazione delle strutture a guscio, superfici resistenti per forma, si distinguono le figure di Antoni Gaudì, di Edoardo Torroja, di Eero Saarinen e di Heinz Isler.

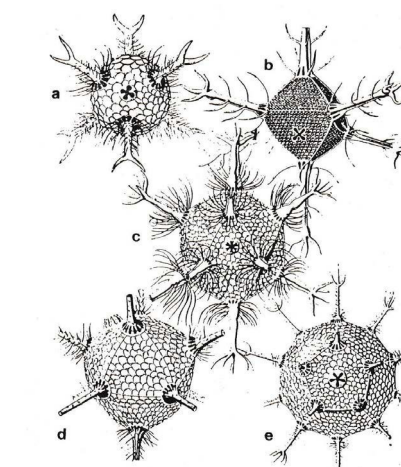
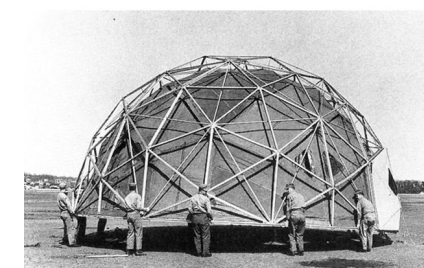
Le molteplici configurazioni sperimentate da Isler dimostrano il carattere flessibile e “speculativo” di cui la superficie, per sua natura, è indiscutibilmente dotata. In questi casi, gli elementi che guidano la genesi della forma non sono enti geometrici direttamente gestibili da un punto di vista grafico, come accade per le superfici rigate sopra citate, ma sono rappresentati da forze, quindi da enti fisici di cui è oggi possibile simulare l’azione in ambiente digitale. Il principio alla base del funzionamento delle strutture a guscio risiede nella coincidenza esatta della struttura con la forma ricavata, garantita dalla ricerca dell’equilibrio tra le forze reali agenti su una geometria di base e la risposta geometrico-morfologica manifestata dalla sua deformazione. Esempi di sistemi impiegati per tale approccio, tanto nella realizzazione di modelli materiali, tanto nella definizione di processi parametrici e computazionali, sono le catenarie e le membrane invertite. La superficie generata dall’interpolazione delle curve e delle membrane rilassate sarà pertanto in grado di resistere alle sollecitazioni proprio in quanto la sua forma è stata determinata dall’azione delle stesse.

In ambito architettonico e strutturale, lo sfruttamento delle plastiche e dei materiali sintetici ha portato alla realizzazione delle strutture

pneumatiche.⁴⁴ Queste architetture di superficie sono realizzate attraverso la tecnica dell’ “ambiente pressurizzato”: le membrane sono sostenute solo dalla pressione dell’aria insufflata all’interno della membrana e sono ancorate al suolo per evitare che la pellicola che costituisce la copertura possa volare via. La membrana può essere realizzata anche mediante l’assemblaggio di più settori di superficie.⁴⁵ Contemporaneamente a queste sperimentazioni, a rappresentare l’*alter ego* delle architetture di superficie, ci sono le strutture e le pelli discrete, architetture che derivano dall’evoluzione degli studi compiuti sui solidi platonici ed archimedei.⁴⁶ Queste architetture fondano la loro genesi sui principi geometrici di tassellazione dello spazio e del piano, mediante la definizione di pattern capaci di esplicitarne le mutue, implicite relazioni. Tassellare significa ricoprire con una o più figure un piano infinito, sia esso euclideo che non euclideo, senza lasciare vuoti tra i vari tasselli e senza creare intersezioni o sovrapposizioni tra di essi; per tassellazione dello spazio s’intende, invece, l’occupazione completa dello spazio ottenuta utilizzando poliedri regolari, poliedri semi-regolari o entrambi.⁴⁷ Il principio di tassellazione spaziale si basa sugli studi e sulle indagini delle formazioni cristalline che compongono la materia e sulle sue aggregazioni molecolari, favorendo un approccio interdisciplinare che ancora oggi rappresenta un importante motore di innovazione e di avanzamento per le attuali ricerche nel campo dell’*Architectural Geometry* (cfr. cap. III). Queste ricerche si basano sugli studi condotti negli anni ’60 da Keith Critchlow sulla tassellazione spaziale e pubblicati nell’opera sua opera *Order in Space*,⁴⁸ e sulle ricerche di Burt,⁴⁹ rivolte allo studio delle strutture degli scheletri e delle configurazioni dei cristalli.

A tale proposito è importante citare le ricerche di George Robert Le Ricolais⁵⁰ ricercatore e pittore costruttivista per il quale le conchiglie, i radiolari, i cristalli rappresentano tutti esempi di vele, reti e strutture che egli cerca di tradurre in progetti avvalendosi di fonti afferenti a diverse discipline.

Agli esordi del XX secolo, tra le prime cupole realizzate in vetro è possibile citare il Padiglione in vetro di Bruno Taut del 1914, o la prima cupola geodetica progettata da Walter Bauerfeld nel 1922 per la realizzazione del *Planetario Zeiss* di Jena. Tali ricerche sono poi confluite e maturate negli esperimenti sulle geodetiche condotti da Buckminster Fuller (1895-1983), i cui studi erano basati sulla discre-



1.39 - Padiglione di vetro, Esposizione Werkbund, B. Taut, Colonia, 1914,
1.40 - R. Buckminster Fuller, installazione di una cupola geodetica.
1.41 - Scheletri di radiolari illustrati da Haeckel.

tizzazione di superfici curve continue.⁵¹

Tuttavia, le strutture a maglie triangolari, sebbene nel corso degli anni siano state considerate le più vantaggiose da un punto di vista economico, in realtà presentano una serie di problematiche e di limiti che hanno portato ad importanti approfondimenti relativamente allo studio e all'applicazione di diversi *pattern* per la discretizzazione delle forme complesse.

Come dimostrato nei capitoli successivi, le proprietà geometriche delle superfici analitiche citate ritornano oggi particolarmente utili per semplificare la realizzazione delle superfici complesse. In conclusione, i numerosi approcci ed esempi citati hanno rappresentato un'importante e corretta fonte di ispirazione per le riflessioni teoriche e per gli esperimenti di ottimizzazione raccolti all'interno di questa ricerca.

Avvalendosi dell'uso della Geometria, l'esigenza attuale è quella di risolvere le problematiche legate alla costruzione delle forme complesse computando soluzioni economicamente sostenibili ed utilizzando materiali capaci di rispondere alle diverse esigenze funzionali ed ambientali. In particolare, essa è rivolta allo studio e alla sperimentazione di soluzioni riferite alla progettazione, ottimizzazione e fabbricazione di sistemi discreti e semi-discreti (cfr. cap.IV).

Note

¹ A. Aymonino, *Superfici*, in Aldo Aymonino, Valerio Paolo Mosco, *Spazi pubblici contemporanei. Architettura a volume zero*, Skira, 2006, p. 25

² R. Banham, *Theory and Design in the First Machine Age*, The MIT Press (2nd Edition), 1980

³ B. Kolarevic, *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Editore Spon Press, 2003

⁴ G. Deleuze, *La piega. Leibniz e il barocco*, Editore Einaudi, 2004

⁵ R. Banham, *Op. cit.*

⁶ Nel paragrafo *Architetture lisce*, in *Architecture in the digital age* (2003), Branko Kolarevic cita quali esempi di tali architetture la *Möbius House* (1995) di UN Studio - Ben Van Berkel e Caroline Boss e la *Torus House* (2001) di Preston Scott Cohen.

⁷ cfr. A. Ippolito, *Interazione tra Disegno e Architettura Digitale*, Tesi di Dottorato di Rilievo e Rappresentazione dell'Ambiente, Università degli studi di Roma "La Sapienza", 2006, pp. 18-19

⁸ Greg Lynn (Ohio, 1964), architetto e designer, nel 1995 ha inventato l'espressione *blobitecture* per indicare forme architettoniche organiche e globulari che instillano nell'edificio un movimento morbido e sinuoso.

Il software di progettazione utilizzato da Lynn per generare strutture dinamiche è *Binary Large Objects (BLOB)* - che permette di modificare gli algoritmi del sistema prevedendo l'evoluzione delle forme in base alla pressione esercitata dall'esterno sulle superfici, da *Greg Lynn e la blob architecture* (4 ottobre 2007) - <http://www.artsblog.it/post/866/greg-lynn-e-la-blob-architecture>

⁹ W. Thomson D'Arcy, *Crescita e forma* (1917), da B. Kolarevic, *Digital Morphogenesis*, cap. 2, in *Architecture in the digital age: Design and Manufacturing*, 2003

¹⁰ M. Novak, *Liquid architectures in cyberspace*, MIT Press Cambridge, MA, USA, 1991

¹¹ cfr. A. Ippolito, *Op. cit.*, p. 69

¹² Le strutture di Marc Fornes consistono in prototipi e ambienti organici, e sono esposte all'interno delle collezioni permanenti del Centre Pompidou, il Centro FRAC e il CNAP. Fornes ha ricevuto l'*A+ Jury Award* e il *40th Annual Interior Design Award*, by the IIDA. Il suo lavoro è stato anche insignito dell'*Architectural League Prize* (2013), del *Design Vanguard*, by Architectural Record (2013) e del *WAN 21 for 21 Award*.

¹³ *Non Lin/Lin Pavilion* by Marc Fornes & The Very Many (2 agosto 2011) - <http://www.dezeen.com/2011/08/02/nonlinlin-pavilion-by-marc-fornes-the-very-many/>

¹⁴ Achim Menges è architetto e professore all'Università di Stoccarda dove, dal 2008, è direttore fondatore del Computational Design Institut. E' stato Visiting Professor in Architettura presso di Harvard University Graduate School of Design, presso la AA School of Architecture di Londra e alla Rice University di Houston. Le sue ricerche e le sue creazioni hanno ricevuto numerosi premi internazionali, sono state pubblicate ed esposte in tutto il mondo, e fanno parte di diverse collezioni museali, tra cui la collezione permanente del Centre Pompidou di Parigi.

¹⁵ <http://www.achimmenges.net/>

¹⁶ Neri Oxman è un designer e architetto israeliano. È nota per il suo lavoro in progettazione ambientale e morfogenesi digitale. Attualmente insegna presso il Massachusetts Institute of Technology Media Lab come professore associato di Media Arts and Sciences, e ha fondato il laboratorio di progettazione Material Ecology.

¹⁷ *Projects* - <http://www.materialecology.com/>

¹⁸ *Ibidem*

¹⁹ cfr. A. Tanzanella, *Luigi Moretti e l'Architettura parametrica. Un approccio moderno* (3 luglio 2013)

http://issuu.com/antonio.tanzarella/docs/articolo_architettura_parametrica/1

²⁰ B. Kolarevic, *Op.cit.*

²¹ *Cos'è il responsive design* - <http://www.html.it/pag/32821/cose-il-responsive-design/>

²² cfr. G. M. Valenti, J. Romor, *Geometria responsiva*, in *Disegnare CON*, vol.5, n.9, 2012, p.309

²³ cfr. A. Nebuloni, M. Romero, G. Vignati, Alberto Gicopelli, Antonio La Marca, *Responsive Morphologies*, Politecnico di Milano, 22 settembre 2014

²⁴ La citazione è tratta da un'intervista rivolta all'architetto olandese nel 1999, da M. Brizzi, *ARCH'IT*": *Kas Oosterhuis. Il lato selvaggio dell'architettura*" - <http://architettura.supereva.com/files/19991100/index.htm>

²⁵ cfr. B. Kolarevic, *Architecture in the digital age: Design and Manufacturing*, 2003

²⁶ *Projects* - <http://www.nox-art-architecture.com/>

²⁷ K. Frampton, *Henry Van de Velde e l'astrazione dell'empatia*, in *Storia dell'Architettura moderna*, Zanichelli Editore, p. 105

²⁸ P. Bertozzi, A. Ghini, L. Guardigli, *Le forme della tradizione in architettura. Esperienze a confronto*, collana di architettura fondata da M. Scolari, Franco Angeli, pp. 601-602

²⁹ http://dizionari.corriere.it/dizionario_italiano/I/iconico.shtml

³⁰ <http://www.treccani.it/vocabolario/iconico/>

³¹ A. Aymonino, *Più spazio, meno volume: un racconto in movimento*, in Aldo Aymonino, Valerio Paolo Mosco, *Op. cit.*, p. 23

³² B. Gravagnuolo, Trentaquattro domande a Benedetto Gravagnuolo, in M. Porrino, *Saper credere in Architettura. 130 domande a presidi di Architettura*, CLEAN Edizioni, p.64

³³ *Il surrealismo e Dalì* - <https://crealarte.wordpress.com>

³⁴ *Vetro curvo made in Italy per Brasile 2014*, Il Mattino di Padova, articolo pubblicato il 28 maggio 2014

³⁵ Colleoni C., *Dal progetto alla realizzazione: ottimizzati soluzioni e tempi* - www.edilizianews.it/articolo/54/dal-progetto-alla-realizzazione-ottimizzati-soluzioni-e-tempi

³⁶ <http://architetturaeffimera.blogspot.it/2007/10/peter-cook-colin-four-nier-kunsthhaus.html>

³⁷ <http://www.arc1.uniroma1.it/saggio/conferenze/Civita/CellnoNet/ricerca/ricerca.htm> – Land art, nArchitects

³⁸ *Ibidem*

³⁹ Il grande Dizionario Garzanti della Lingua italiana, Garzanti Editore

⁴⁰ cfr. M. Capone, *Geometria per l'architettura*, Giannini Editore, Napoli, 2012, pp. 12-13

⁴¹ cfr. M. Capone, *Op. cit.*, pp. 14-15

⁴² M. Capone, *Op. cit.*, p. 19

⁴³ cfr. S.Pone, *L'idea di struttura*, Franco Angeli Editore, Milano, 2005, pp. 49-51

⁴⁴ cfr. S.Pone, *Op. cit.*, pp. 83-84

⁴⁵ cfr. S.Pone, *Op. cit.*, p. 105

⁴⁶ I solidi platonici ed archimedei non sono oggetto di approfondimento di questa ricerca in quanto argomento molto studiato da numerose trattazioni in merito.

⁴⁷ L. Baglioni, *I poliedri regolari e semiregolari con un approfondimento sulle cupole geodetiche*, in R. Migliari, *Geometria Descrittiva – Volume II – Tecniche e Applicazioni*, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, pp. 327-331

⁴⁸ K. Critchlow, *Order in Space: A Design Source Book*, Thames & Hudson, 1969

⁴⁹ M. Burt, *Saddle Polyhedra & close-packing*, in *Zodiac*, n.22, 1973

⁵⁰ R. Le Ricolais, *A la recherche d'une mécanique des formes*, Paris : Palais de la de'cou-verte (Alençon, Impr. alençonnaise), 1966

⁵¹ cfr. M. Capone, *Op. cit.*, p. 71

Key-words

I percorsi della costruzione contemporanea sembrano incrociarsi con la necessità di rivisitare alcuni concetti di base che la caratterizzavano, tra cui quelli dell'industrializzazione e dell'innovazione tecnologica.

Mario Losasso

2.1 Forma complessa: il problema

Nel capitolo precedente, la superficie è stata definita “un supporto complesso”.

Il termine complesso deriva dal latino *complexus*, che significa abbraccio, a sua volta derivante da *complectere*, ossia *cum – plectere*, o *plettere*, che significa intrecciare.

Un'entità complessa può dunque essere considerata come un sistema composto da più parti strettamente intrecciate o connesse.

La moderna teoria della complessità è legata alla teoria del caos, fondata sull'esistenza di proprietà emergenti dall'interazione non-lineare di tutti gli elementi che costituiscono un sistema. Per comportamento emergente di un sistema complesso si intende, dunque, l'emersione di proprietà inspiegabili sulla sola base delle leggi che governano separatamente le sue componenti.¹

I sistemi “non lineari” mutano continuamente, producendo risultati inaspettati. Il loro comportamento non può essere spiegato attraverso la semplice analisi dei singoli componenti, perché è la rete di interdipendenze e interazioni che ne definiscono il funzionamento.²

Nella sua totalità, la complessità delle forme dell'architettura contemporanea può essere indagata e interpretata da diversi punti di vista, concettuale, spaziale e tecnologico.

La logica di aggregazione e le relazioni di interdipendenza degli elementi costituenti l'Architettura si riflettono nella complessità ed uni-

cità della realtà compositiva e costruttiva.

Per comprendere le regole che sottendono le forme architettoniche contemporanee è necessario scavare a fondo l'identità delle superfici complesse, instaurando un dialogo continuo tra i modelli digitali e la loro interpretazione matematico-geometrica.³

*“Nel contesto del CAD 3D le forme si distinguono in semplici o complesse a seconda che le superfici che compongono la forma siano analitiche o a forma libera (free form), intendendo con analitiche le superfici che tutti conosciamo quali piani, cilindri e coni ..., e intendendo con free form tutte le altre.”*⁴

Molteplici sono le tecniche computazionali per la genesi di forme complesse, dalle polisuperfici isomorfe (*blob*), alla progettazione parametrica e computazionale.⁵

Le forme complesse, generate al computer, sembrano ignorare o sfidare le convenzioni di stile o di estetica in favore di una continua attività a servizio della speculazione.⁶

L'opportunità di generare e di manipolare l'architettura attraverso la finestra virtuale del computer, consente di focalizzare l'attenzione sulle proprietà geometriche della forma e di ragionare attraverso figure e solidi elementari, alla ricerca di una possibile scomposizione e semplificazione della complessità.⁷

La complessità delle forme contemporanee spinge al massimo la potenzialità espressiva dell'architettura; tuttavia, è necessario un bagaglio tecnico di livello elevato per raggiungere delle soluzioni costruttive fattibili e sostenibili.

Il carattere complesso ed articolato delle forme libere non consente, infatti, di definire un unico iter analitico per il controllo dell'intero processo. Gestire la complessità scomponendo un progetto in sotto-progetti, per poi ricomporli in seguito, rappresenta un approccio errato al problema.

La qualità della progettazione e della realizzazione di una forma complessa dipende, a sua volta, dalla quantità e dalla qualità delle informazioni, delle conoscenze e delle competenze coinvolte. Pertanto, gli approcci contemporanei hanno progressivamente abbandonato le pratiche di progettazione tradizionale e hanno abbracciato i nuovi processi digitali, capaci di veicolare una forma verso il risultato complessivo che s'intende raggiungere.⁸ Invece di lavorare sulle singole parti, il progettista genera in maniera globale la forma, controllandone il comportamento nel corso del tempo e al variare delle informazioni di input.

La forma viene in seguito sottoposta a processi di deformazione o di trasformazione, i cui esiti dipendono dalle relazioni che strutturano il sistema stesso e che determinano una configurazione emergente tra le infinite possibili: in un sistema non lineare, l'aggiunta o la sottrazione di un particolare tipo d'informazioni possono influenzarne notevolmente il comportamento.

Compito del progettista è indagare criticamente le diverse soluzioni progressivamente generate per convergere verso una scelta opportunamente ponderata: sulla base di tale consapevolezza si fonda la ricerca delle tecniche di ottimizzazione.⁹

Pertanto, approcciare in maniera consapevole alle attuali tecnologie informatiche disponibili è fondamentale per gestire la complessità delle forme in maniera scientifica e rigorosa.

Lo scopo è generare le forme complesse per fornire una risposta ottimizzata ai problemi complessi.

2.2 Discretizzazione: il mezzo

Se è possibile considerare una superficie complessa come un sistema composto da più parti mutuamente connesse ed interagenti, questo equivale a dire che essa è fondamentalmente sempre discreta.

Data una superficie, è sempre possibile scomporla meccanicamente in un certo numero di parti.

Tuttavia, il termine discreto assume anche il significato di “scelto”, di “misurato”, individuando quindi qualcosa di più del semplice significato di “suddiviso” o di “scomposto”.

Nei secoli sono stati sviluppati diversi approcci mirati alla ricerca di modelli applicativi che tentano di estrarre e di combinare le singole componenti discrete di un sistema alla ricerca di uno status di equilibrio e di armonia.

Il metodo analitico classico di Cartesio procede all'analisi di un sistema complesso suddividendolo in parti ed indagandone approfonditamente ciascuna di esse.

Di contro, l'approccio olistico si basa sul concetto di emergenza, intesa come il risultato dell'interrelazione di molte entità che vanno a costituire un sistema: secondo questo punto di vista, l'azione del discretizzare può essere considerata coincidente con lo studio della qualità delle interazioni tra le parti, la quale prende il sopravvento

rispetto allo studio delle parti stesse.

Il termine ologismo deriva dal greco *ὅλος*, e significa “totalità”.¹⁰

La parola è stata coniata da Christiaan Jan Smuts, che definisce l’ologismo “*the tendency in nature to form wholes that are greater than the sum of the parts through creative evolution.*”¹²

Secondo tale visione esiste, pertanto, una differenza qualitativa tra un sistema e la somma delle sue parti: la seconda domina sul primo. Un oggetto o un sistema può essere riconosciuto come un “tipo” attraverso l’individuazione di alcune caratteristiche interdipendenti in grado di renderne riconoscibile l’identità. Lo scopo è effettuare una discretizzazione o, in senso più ampio, una razionalizzazione capace di assecondare tali interrelazioni, rivelandone l’esistenza e, dunque, assecondando la natura di un dato oggetto.

In ambito digitale, secondo tale punto di vista, discretizzare una superficie complessa non si riduce, dunque, all’atto di suddividere meccanicamente una superficie in un certo numero di parti, ma significa tradurre le intime relazioni attraverso un codice comprensibile e manipolabile. Nella grammatica del progetto, costruire significa assemblare le singole parti dell’architettura distribuendole secondo l’uso di regole geometriche. In qualsiasi ambito, discretizzare significa, dunque, scegliere, “interpretare”.

In Architettura, l’atto del discretizzare, quindi, è un processo finalizzato a raggiungere un sistema funzionante e non può ridursi ad una semplice, meccanica suddivisione della forma.¹³

Per ottimizzare la costruzione di un’architettura di forma complessa è dunque importante evitare la distribuzione casuale delle parti che la compongono. Tale casualità è il risultato derivante dall’applicazione di tecniche di discretizzazione totalmente indifferenti alla natura dell’oggetto sul quale sono applicate.

2.3 Ottimizzazione: il processo

Ottimizzare significa intervenire sulle relazioni esistenti all’interno del sistema allo scopo di ricavare un risultato efficiente impiegando una quantità di risorse ponderata.

Dunque, tanto il sistema continuo, quanto la sua versione discreta possono essere oggetto di ottimizzazione.

Tale condizione, riportata in ambito architettonico, è necessaria per

produrre risultati sostenibili.

Nonostante la parola ottimizzazione contenga al suo interno il termine “ottimo”, un processo di ottimizzazione produce un sistema “quasi-ottimale”, quindi non concluso o comunque imperfetto.

Nel campo matematico – informatico ottimizzare significa trovare la migliore soluzione tra tutte le soluzioni fattibili mediante un approccio iterativo di tipo combinatorio delle diverse variabili in gioco. A tale scopo, gli algoritmi sono progettati per trovare soluzioni quasi-ottimali a problemi difficili.¹⁴

E’ utile distinguere tra metodi esatti e metodi euristici. Un metodo esatto garantisce il raggiungimento della soluzione ottima; viceversa un metodo euristico è un metodo diretto alla scoperta di nuovi, continui risultati,¹⁵ non può fornire garanzie sull’ottimalità della soluzione e, nella maggioranza dei casi, si limita a produrre soluzioni ragionevolmente buone, sulla base di criteri fissati a priori. Ogni realtà operativa o produttiva impone, in sede di formulazione del problema, richieste, vincoli e restrizioni legate alle tecnologie utilizzate e al tipo di prodotto. Dunque, tanto più complesso e peculiare è il contesto d’azione, tanto sarà preferibile utilizzare metodi euristici per la ricerca di soluzioni.¹⁶

Nel campo della realizzazione di architetture di forma complessa, scopo dell’ottimizzazione è raggiungere, contestualmente, la sostenibilità economica, strutturale ed estetica del prodotto.

Come la fantasia è capace di evocare una sorprendente varietà di superfici, così è necessario gestire la qualità complessiva del risultato, trovando un equilibrio tra il livello di approssimazione geometrica del sistema, le tecnologie disponibili, la qualità costruttiva ed estetica del prodotto ed i costi.

Tuttavia, i processi industriali, in quanto basati sulle proprie regole, logiche e limitazioni, si scontrano con i problemi derivanti dalla complessità delle forme attuali: ottimizzare l’intero processo significa ridurre questa discrepanza già a partire dalla fase progettuale.¹⁷

E’ fondamentale sottolineare che il problema non si riduce alla sola individuazione di una tecnologia adeguata per favorire la realizzazione del progetto, ma incoraggia l’esigenza di fare progredire la ricerca verso soluzioni tecniche avanzate e innovative.

Alla luce di tale esigenza, in campo architettonico, ottimizzare significa anche favorire la creazione di processi integrati attraverso lo sviluppo di nuove competenze da parte delle figure coinvolte nel

processo: lo scopo è favorire l'innovazione dei processi, congiungendo le conoscenze produttive ed eventualmente derivanti da altri settori con le necessità talvolta fortemente espressive del progetto. L'acquisizione di nuove conoscenze e lo sviluppo di soluzioni, inoltre, favoriscono la crescita delle richieste e determinano un abbassamento dei costi.

Come Fuller suggerisce “*Non cambierai mai le cose combattendo la realtà esistente. Per cambiare qualcosa, costruisci un modello nuovo che renda la realtà obsoleta.*”

Pertanto, ottimizzazione e innovazione sono da considerare due processi strettamente interdipendenti: lo sviluppo dell'uno è favorito dagli avanzamenti dell'altro. La mancanza di innovazione tecnologica è talvolta legata al vincolo delle tecnologie esistenti e delle conoscenze limitate alle loro funzioni tipiche, spesso trascurando, anche per lungo tempo, le effettive o eventuali potenzialità di una nuova tecnologia: dunque è il contesto che favorisce l'introduzione e lo sviluppo di un sistema o di un elemento innovativo.

I processi ottimizzati prevedono, dunque, la sperimentazione di continue verifiche e prototipazioni atte a validare una possibile soluzione. *L'obiettivo finale è costruire un modello a quattro dimensioni codificato con tutte le informazioni dimensionali, qualitative e quantitative necessarie per la progettazione, l'analisi, la fabbricazione e la costruzione, oltre che con le informazioni basate sul tempo necessario per le sequenze di montaggio.*¹⁸

In ambiente digitale, i processi di ottimizzazione, da semplice strumento di risoluzione a posteriori di problemi, stanno diventando un efficace strumento di esplorazione e di progettazione formale.¹⁹

L'affiancamento di potenti strumenti digitali, come i software parametrici, alle consuete tecniche progettuali, non solo ottimizza le possibilità di carattere rappresentativo ma aggiunge informazioni utili per la concretizzazione del progetto,²⁰ riducendo quindi i tempi necessari per il completamento dei cicli di fabbricazione e delle conseguenti fasi di assemblaggio in cantiere.

Un ulteriore aspetto legato alla fabbricazione delle superfici complesse riguarda l'ottimizzazione dei materiali: da sempre, l'ambizione è quella di raggiungere la progressiva diminuzione degli stessi nella realizzazione delle strutture. Tale condizione favorisce la riduzione del peso complessivo ed è legata alla riduzione della complessità dei nodi di giunzione tra gli elementi, aspetto che a sua volta chiama in causa lo studio approfondito dei *pattern* in maniera tale da favorire un

processo di fabbricazione e di assemblaggio ottimizzato.

Inoltre, la ricerca dell'ottimizzazione si sviluppa anche attraverso la computazione di soluzioni formali in grado di combinare le strategie di razionalizzazione e il controllo del sistema in termini di sostenibilità ambientale.

Pertanto, è importante dedicare una particolare attenzione all'involucro, da progettare in funzione dell'ambiente circostante, del risparmio energetico, della fattibilità, della stabilità e della manutenibilità.²¹

Le forme complesse rappresentano un supporto idoneo per favorire lo sviluppo di interessanti sperimentazioni in tale direzione. La superficie di una forma complessa è quantitativamente inferiore rispetto a quella di una primitiva geometrica di volume identico: ciò determina, ad esempio, non solo la conseguente riduzione del numero di elementi necessari per la sua realizzazione, ma anche la riduzione delle dispersioni termiche del sistema e il guadagno di calore interno. A tale scopo, il calcolo analitico eseguito per la verifica prestazionale degli edifici può essere utilizzato “a priori” per modellare la forma degli edifici in modo dinamico e performante, alterando le geometrie e trasformando le forme sulla base dell'ottimizzazione di specifici criteri: acustici, termici, ecc.

Le forme complesse non rappresentano, dunque, solo l'espressione di una nuova estetica, o un particolare momento culturale e socio-economico generato dalla rivoluzione digitale, ma possono essere considerate il luogo per sperimentare e ottimizzare le soluzioni a cui la nuova coscienza ecologica mira per la realizzazione di un'architettura sostenibile.²²

2.3 Industrializzazione: l'obiettivo

*Il momento centrale del processo di modernizzazione, che con essa tende a identificarsi, è costituito dall'industrializzazione dei processi produttivi.*²³

L'ottimizzazione rappresenta la premessa per lo sviluppo di processi industrializzati; allo stesso tempo, l'industrializzazione dei processi produttivi favorisce la trasformazione della conoscenza scientifica in tecnologia.²⁴

Industrializzare un processo, pertanto, significa fondere e gestire in maniera ottimizzata le nuove conoscenze teoriche, tecnologiche e tecniche per sperimentare ed acquisire nuove tecnologie e materiali.²⁵

Il fenomeno dell'industrializzazione, grazie alle sue origini ed alle sue continue manifestazioni, nel tempo e nello spazio, è di tale portata che la sua risonanza non può essere limitata all'interno di definizioni troppo rigide o di spiegazioni riduttive e unilaterali.

In quanto tale, è un evento fondamentale per comprendere il verificarsi di diversi fenomeni sviluppatisi all'interno di ambiti differenti da quello di tipo esclusivamente economico o tecnologico, tra cui quello sociale, culturale e investendo quindi anche quello architettonico.²⁶

Dal punto di vista storico, i primi settori investiti dal fenomeno dell'Industrializzazione sono stati i settori produttivi dei materiali e degli elementi costruttivi.²⁷ Tra il XVIII e il XIX secolo l'artigianato si è evoluto verso le forme di produzione industriale: l'introduzione delle macchine ha mutato radicalmente le condizioni della fabbricazione. La rivoluzione industriale ha dato il via, con l'utilizzo massiccio del ferro e del carbone, alla più radicale trasformazione delle forme produttive della storia umana ed i pensatori, i filosofi e gli intellettuali in genere, hanno cercato di cogliere, analizzare e decodificare gli aspetti sociali e culturali di un fenomeno di tale portata, impegnandosi nella costruzione di filosofie in grado spiegare ciò che stava accadendo. Se la prima rivoluzione industriale, che aveva nelle fabbriche, nel settore tessile e nell'invenzione della ferrovia i suoi cardini, è stata l'età dei pensatori "economisti", la seconda rivoluzione, periodo di straordinario progresso scientifico esteso a tutti i campi del sapere (dalle scienze naturali a quelle umane), ha segnato il definitivo divorzio tra la scienza e la filosofia vera e propria e ha favorito il trionfo del Positivismo, mito del progresso e culto della scienza, che denomina complessivamente la tendenza di un'epoca.

Il decollo del sistema industriale, della scienza e della tecnica, la possibilità di accelerare gli scambi commerciali e culturali su larga scala ha determinato un "clima" di fiducia entusiastica nelle potenzialità del sapere scientifico e tecnologico e una generale fiducia nell'incontrastabile progresso umano. Il continuo avanzamento della ricerca (nella chimica, nella fisica, nell'ingegneria, nella medicina) si tradurrà in una vera e propria dipendenza dal pensiero e dall'approccio di tipo scientifico e tecnico.

In questo clima, i primi tentativi di accorciare le distanze tra le "belle arti" e le arti applicate, procedendo verso la nascita del design novecentesco, risalgono alla seconda metà dell'Ottocento, quando

William Morris diede vita al movimento denominato *Arts and Crafts*, opponendosi alla produzione massificata delle industrie e sostenendo il recupero del lavoro artigianale per combattere l'alienazione provocata dai processi di meccanizzazione.

Tuttavia, gli alti costi dei prodotti hanno impedito la realizzazione del suo programma, limitandone la fruizione ad un'utenza selezionata.

La sua eredità è stata accolta da Henry van de Velde che, a differenza da Morris, considerava l'impiego delle macchine e delle nuove tecnologie industriali il solo mezzo per avviare il rinnovamento della società moderna.

La ricerca sul fenomeno dell'industrializzazione richiama, inevitabilmente, l'opera ed il pensiero dei maestri del Movimento Moderno, tra cui Gropius, Le Corbusier ed i loro progetti per componenti standardizzati prefabbricati, sviluppati attraverso il tema della casa di abitazione e dell'alloggio di massa.

Successivamente, il fenomeno dell'industrializzazione tende a rallentare nel settore residenziale e si sposta verso le strutture con funzione collettiva, il che determina anche uno spostamento dell'interesse dai sistemi "massivi" ai sistemi di superficie composti unicamente da struttura e involucro, i quali aprono ulteriori ambiti di ricerca nei sistemi industrializzati per il progetto. Soltanto nel XX secolo, grazie all'avvenuto processo di standardizzazione e di unificazione dei prodotti, si giunge ai sistemi costruttivi totalmente prefabbricati e prodotti per via industriale, accompagnati anche da una progressiva meccanizzazione dei cantieri. L'attività cantieristica può, infatti, usufruire di una serie di prodotti industriali che riducono al minimo le lavorazioni in loco dei materiali.²⁸

La produzione di massa si evolve verso tecniche di produzioni più snelle e veloci, consentite dall'uso di macchine guidate da manodopera specializzata: ciò ha favorito la risoluzione di molteplici problemi legati alla complessità realizzativa dei progetti.

Attualmente, il progetto di architettura, grazie all'incremento esponenziale delle tecnologie presenti sul mercato, è il prodotto di un processo che anticipa, e dunque veicola, le fasi tecnologiche e produttive: ciò favorisce lo sviluppo di sistemi e di prodotti prefabbricati e successivamente assemblati in cantiere, determinando sempre più la progressiva industrializzazione dei processi, successivamente assemblati in cantiere.²⁹

L'attuale processo di industrializzazione può essere diviso in varie

fasi: in una prima fase si analizzano le richieste in collaborazione con il cliente, si procede poi con lo sviluppo di soluzioni tecniche ottenute con programmi CAD evoluti, ed infine si passa alle fasi di prototipazione e di collaudo del prodotto. Questo permette di valutare eventuali soluzioni alternative per migliorare il prodotto e l'intero processo di fabbricazione.

Negli ultimi decenni, nel mondo della progettazione architettonica e più in generale del design, si è assistito ad una vera e propria rivoluzione digitale, grazie allo sviluppo di applicazioni e *software* dedicati alla modellazione tridimensionale sempre più avanzati ma, allo stesso tempo, intuitivi e di facile utilizzo.

Allo stesso modo, sul lato *hardware* si sta delineando una nuova trasformazione dei processi produttivi, rappresentata dalla *Mass Customization*.³⁰ In questo nuovo scenario l'impiego di sistemi computerizzati consente di ottenere output personalizzabili in funzione delle esigenze dell'utente, fino ad arrivare all'autoproduzione degli oggetti da parte degli stessi utilizzatori.³¹

L'industria si ritrova dunque a dialogare e ad adattarsi alle esigenze delle imprese e dei singoli professionisti e, pertanto, deve essere in grado di rispondere alle richieste di flessibilità e di innovazione avanzate dai progettisti, realizzando prodotti sempre più spesso disegnati ad hoc, ma che prevedano comunque dei processi di ottimizzazione per il controllo della produzione.

Per comprendere ed affrontare il problema della fabbricazione di forme complesse è interessante declinare il problema tanto dal punto di vista dell'industrializzazione del processo, più vicino alla grande scala, quanto da quello della produzione artigianale, sicuramente più vicino ad una scala di design, quindi dimensionalmente più limitata e che, per tali ragioni, consente una maggiore libertà di azione.

A tale scopo è importante comprendere il legame che si instaura tra tradizione ed innovazione. La tradizione artigiana da sempre è accompagnata da una precisa vocazione all'innovazione, la quale oggi si manifesta nel passaggio dall'idea concettuale alla prototipazione attraverso la fabbricazione digitale di prototipi. In questi dieci anni, l'idea dei Fab Lab, il laboratorio pensato da Neil Gershenfeld al MIT di Boston, si è evoluta ed è cresciuta a dismisura.³²

“I nostri personal computer saranno presto affiancati nelle nostre case dai personal fabricator, stampanti tridimensionali in grado di assemblare vere e proprie macchine: metastrumenti, insomma, la cui esistenza è stata per lungo tempo uno

dei grandi temi della fantascienza. Oggi, questa idea è già una realtà: creare su misura ciò di cui si ha bisogno o semplicemente si desidera avere”.³³

I Fab Lab permettono di realizzare, di sperimentare e di fare ricerca espandendo la creatività ad un costo basso e con risultati notevolissimi, ed evitando che molte ipotesi rimangano dei concetti teorici sviluppati e dimostrati solo su carta. Ciò permette di comprendere le motivazioni che attualmente incoraggiano le aziende con una lunga tradizione nella storia dell'artigianato ad investire sui FabLab.

“Esplorare le potenzialità di relazione che possono esistere tra l'approccio al design contemporaneo e la capacità realizzativa che le aziende manifatturiere, in possesso di strumentazione adatta, possono realmente offrire al fine di implementare l'innovazione del tessuto produttivo”.³⁴

Molte aziende tecnologicamente avanzate sono in grado di realizzare prodotti estremamente complessi: l'unico limite di lavorazione è rappresentato dalle capacità dell'immaginazione umana. I possibili benefici raggiungibili sono lo sviluppo di conoscenze e di tecnologie avanzate, l'apertura di nuovi mercati e lo sviluppo di nuove opportunità di business e di sinergie interessanti tra realtà differenti.

In diversi paesi europei, i *teams* operanti in questo settore sono molto più ampi e strutturati a rete fornendo consulenze altamente specialistiche.³⁵ Ciò richiede alla “ritrovata figura dell'architetto” un *know-how* più ricco e flessibile, basato sulla consapevolezza dei sistemi di produzione alla ricerca di soluzioni tecniche adatte alle forme complesse ed allo stesso tempo capaci di restituire prestazioni elevate.

Il rinnovato e potenziato rapporto con l'industria è incoraggiato dalle potenzialità degli strumenti informatici, che consentono un'intermediazione efficace dei contenuti del progetto e l'intervento diretto da parte del progettista nella catena produttiva, stimolando continuamente la ricerca di tecnologie avanzate ed innovative, sempre e comunque attraverso un'integrazione con altre figure specializzate (matematici, informatici, ingegneri, etc.). La sintesi tra i nuovi modi di progettazione computazionale, i materiali, e la fabbricazione automatizzata consente sia l'esplorazione di un nuovo repertorio di possibilità architettoniche e lo sviluppo di strutture estremamente leggere e materialmente efficienti, dunque ottimizzate.

Il settore emergente dell'*Architectural Geometry* (cfr. cap.III) mira a definire e ad ottimizzare gli approcci rivolti alla soluzione di tali problematiche.

Note

¹ *Olismo e Scienza olistica* - Wikipedia

² cfr. B. Kolarevic, *Digital Morphogenesis, in Architecture in the digital age: Design and Manufacturing*, Editore Spon Press, 2003

³ cfr. M. Campi, *L'indagine multimediale della forma. Dal lessico geometrico alle simulazioni previsionali per la rappresentazione dell'Architettura*, Editrice Gaia, 2007, p. 10

⁴ R.Ciarloni, *Le teorie e le tecniche della rappresentazione matematica - Strategie di modellazione nei sistemi CAD*, in R. Migliari, *Geometria Descrittiva – Volume II – Tecniche e Applicazioni*, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, p.. 42

⁵ cfr. B. Kolarevic, *Op. cit*

⁶ cfr. B. Kolarevic, *Dal Barocco a Ghery*, in *Architecture in the digital age* (2003)

⁷ cfr. M. Galizia, C. Santagati, *Architettura e/è Geometria: dalla forma architettonica alla costruzione geometrica*, in *Disegnare con*, giugno 2012, p. 143

⁸ cfr. I. Paoletti, *Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura*, Libreria CLUP, Milano, 2006

⁹ cfr. B. Kolarevic, *Op. cit*, pag 17

¹⁰ *Olismo* - <http://it.wikipedia.org/wiki/Olismo>

¹¹ J. C. Smuth, *Holism and Hevolution*, The Macmillan company in New York, 1926

¹² Secondo l'Oxford English Dictionary, Smuts ha definito l'olismo come “la tendenza, in natura, a formare interi che sono più grandi della somma delle parti, attraverso l'evoluzione creativa” - <http://it.wikipedia.org/wiki/Olismo>

¹³ cfr. M.Galizia, C. Santagati, *Op. cit.*, pp. 135-136

¹⁴ *Problema di ottimizzazione*,

http://it.wikipedia.org/wiki/Problema_di_ottimizzazione

¹⁵ N. Zingarelli, Lo Zingarelli. Vocabolario della Lingua Italiana, Zanichelli Editore

¹⁶ cfr. F. Pastorello, *Applicazione di Algoritmi di Nesting alla robotica industriale*, Tesi di Laurea – Relatore: prof. Giovanni Boschetti, Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale, Università degli Studi di Padova - Facoltà di Ingegneria, 2011, p. 13

¹⁷ cfr. B. Vaudeville, M. King, S. Aubry, J. Raynaud, M. Chalaux, A. Witt, *How Irregular Geometry and Industrial Process Come Together: A Case Study of the “Fondation Louis Vuitton Pour la Creation”*, Paris, in *Advances in Architectural Geometry* 2012, Springer-Verlag/Vienna New York , 2012, pp. 279-280

¹⁸ B. Kolarevic, *Continuum digitale*, in *Architecture in the digital age* (2003)

¹⁹ cfr. A. Pugnale, *(Digital) form finding*, in Arturo Tedeschi, *Algorithmic Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*, Le Penseur Edizioni, 2014, pp. 353-359

²⁰ cfr. I. Paoletti, *Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione*

e trasferimento per il progetto di architettura, Libreria CLUP, Milano, 2006

²¹ cfr. M. Foletto, M. Guagnini, *Progettare l'involucro edilizio. Risultati delle prime esperienze condotte presso il politecnico di Torino*, in *L'involucro edilizio: una progettazione complessa* , a cura di Greco A., Quagliarini E., Alinea Editrice, Firenze, 2007, p. 257

²² cfr. B. Kolarevic. *Digital Morphogenesis, in Architecture in the digital age* (2003), cap. II, p.11-27

²³ O. Paz, Octavio Paz, Béla Lajta, Craig Ellwood: *metamorfosi della modernità Che cos'è la modernità?*, in Casabella 664, Mondadori, Milano, febbraio 1999, p. 48

²⁴ cfr. Ibidem

²⁵ cfr. M. Berman, *L'esperienza della modernità*, Il mulino, Bologna, 1978, p.200

²⁶ cfr. I.Paoletti, *Op. cit*, p. 200

²⁷ cfr.L'Universale. La grande enciclopedia tematica, Garzanti Libri S.p.A., Milano, Volume I, 2004

²⁸ Ibidem

²⁹ cfr. I. Paoletti, S. Converso, *Da Gehry... in avanti*,

http://ftp2.bentley.com/dist/collateral/docs/press/Da-Gehry-in-Avanti_Modulo_IT.pdf, p. 520

³⁰ cfr. E. Antonioli, *Robot E Architettura*, in Nuova Finestra n. 402, DBInformation, Maggio 2014, pp. 60-64 - <http://www.officina-artec.com/robot-e-architettura/>

³¹ Ibidem

³² Neil Gershenfeld è un accademico statunitense. Docente presso il Massachusetts Institute of Technology, è direttore del Center for Bits and Atoms.

³³ N. Gershenfeld, Fab. *Dal personal computer al personal fabricator*, tradutto da I. Manzoni, J. Romoli, Editore Codice, 2005 -

www.amazon.it/Fab-Dal-personal-computer-fabricator/dp/887578034X

³³ <http://www.makeinitaly.foundation>

³⁴ A. Picerno Ceraso (2014), in *Un concorso destinato ai designer* (20novembre2014), <http://ricerca.gelocal.it/lacittadisalerno/archivio/lacittadisalerno/2014/> in la Città di Salerno,

<http://lacittadisalerno.gelocal.it/salerno>

³⁵ cfr. I. Paoletti, *Op. cit*

Research in Architectural Geometry

Comprendere vuol dire essere capaci di fare.

Johann Wolfgang von Goethe

3.1 La figura dell’architetto: un approccio olistico

Il genere umano, in maniera più o meno consapevole, ha da sempre affrontato i problemi inerenti la definizione geometrica e la fattibilità delle strutture.

Il fenomeno dell’industrializzazione rappresenta una chiara dimostrazione di quanto l’evoluzione di un processo, di qualunque natura esso sia, coinvolga molteplici ambiti, da quelli teorici, a quelli di natura pratica: entrambe le tipologie sono da sempre oggetto delle competenze dell’architetto.

“Qualsiasi lavoro riguardante la trattazione dell’architettura oggi non può più prescindere dal considerare la condizione dell’architetto e della sua figura”.¹

Progettare e realizzare forme e strutture irregolari da sempre rappresenta una sfida importante per gli architetti e per i designer, in quanto la complessità delle forme complica i confini della fattibilità di tali architetture, favorendo necessariamente il coinvolgimento di contenuti afferenti ad altri settori.

Già tra il 30 e il 20 a.C., Vitruvio affermava che il sapere dell’architetto è ricco degli apporti di numerosi ambiti disciplinari.²

La parola architetto deriva dal greco *architékton*, *capo dei lavoratori*, cioè *colui che fornisce principalmente i progetti*.³ Tuttavia, l’attuale, marcata suddivisione dei compiti e delle competenze e la mancanza di collaborazione tra le figure coinvolte nel processo generano risultati talvolta

incoerenti e non ottimizzati. Per trovare una soluzione a tale fenomeno, i matematici studiano metodi capaci di consentire la fattibilità di tali opere, sperimentando nuove tecnologie e materiali e puntando su un approccio di tipo integrato, che preveda il coinvolgimento di diverse discipline, e quindi di differenti figure.

Tracciare una sintesi della strada fino ad oggi percorsa è utile per comprendere meglio l'attuale contesto.

Da sempre, i progettisti affrontano i problemi legati all'uso dei materiali, tra cui la pietra, il legno, i mattoni e i metalli per la realizzazione di opere architettoniche: questi materiali, oggi come in passato, garantiscono la coerenza tra i linguaggi architettonici e le sintassi attraverso cui essi sono strutturati, che si tratti della composizione di un ordine architettonico o della realizzazione di un involucro complesso.

Fin dall'antichità l'architettura è basata sul legame tra matematica e rappresentazione. In origine, la composizione e la percezione degli elementi costruttivi sono organizzate all'interno di una conoscenza e di uno spazio geometrico di tipo euclideo.

I rivoluzionari costruttori delle cattedrali medievali erano esperti tanto dell'arte del costruire, quanto di tutte le altre attività del cantiere, fornendo soluzioni a qualsiasi problema.⁴

Nel XVI secolo, la rivoluzione copernicana, legata al pensiero di Galileo⁵ e di Newton⁶, assume una dimensione filosofica che si concretizza in una nuova concezione dell'uomo e del suo ruolo e che condurrà ad una rivoluzione scientifica fondata su quei principi che caratterizzano ancora oggi l'idea di scienza. In primo luogo si afferma la ricerca fondata sull'osservazione e verifica dei risultati legata all'impiego di nuove tecnologie e del calcolo matematico e la ricerca assume quindi una dimensione scientifica che porterà, nei secoli seguenti, all'elaborazione di teorie quali l'Illuminismo e il Positivismo. Per cui, se l'Illuminismo aveva celebrato come tipo ideale il "filosofo" ed il Romanticismo "il poeta", il Positivismo esalta soprattutto lo "scienziato", di cui è incarnazione massima quel Newton della biologia che è Darwin.⁷

Le possibilità derivanti dagli studi della matematica alimentano nei filosofi la fiducia che la diffusione della conoscenza scientifica possa sanare i mali da cui la società è afflitta. Gustave Comte riteneva la matematica quale scienza fondamentale, alla base di tutte le altre.

Ogni scienza più complessa eredita nella sua indagine i risultati ed i principi delle scienze precedenti e serve di base per quelle successive, pur non essendo ad esse riducibile.⁸ Le innovazioni di questo fenomeno, inevitabilmente, investono tutti i campi del sapere, coinvolgendo inevitabilmente anche la figura dell'architetto.

All'inizio del XIX secolo, le prime grandi scoperte nel campo della matematica, da Leibnitz a Monge, determinarono una svolta legata alla sistematizzazione dei principi teorici ed alla comparsa dei nuovi materiali, tra cui l'acciaio. Gradualmente, le formule legate alla resistenza dei materiali sostituiscono le antiche teorie di proporzione. Tale approccio culmina negli studi pubblicati da ingegneri come Henri Navier, Augustin Louis Cauchy o Jean-Claude Barre de Saint-Venant.⁹

Lo sviluppo di un approccio fortemente scientifico, attraverso cui affrontare le nuove sfide architettoniche, ha causato la separazione tra la figura dell'architetto e quella dell'ingegnere, segnandone i futuri rapporti e delineandone i relativi, differenti profili.

Con l'ascesa dell'industria automobilistica, aeronautica e l'uso di materiali quali il cemento armato, il vetro e l'acciaio, la cultura matematica dell'ingegnere è sempre più necessaria alla definizione delle logiche d'industrializzazione e di commercializzazione dei processi: il linguaggio razionale della matematica, dalla fine del XIX secolo e per tutto il XX secolo, è sempre più dominante ed influente, ponendosi al centro degli studi condotti all'interno di ogni campo.

I lavori sulla geometria frattale del matematico polacco Benoit Mandelbrot¹⁰ e la *teoria delle catastrofi*, mediante la quale René Thorn¹¹ mira ad applicare la matematica ai fenomeni naturali, rappresentano solo alcuni degli esempi dello sviluppo di tale fenomeno.

Gli anni del conflitto bellico mondiale datano l'inizio di una vera e propria rivoluzione che condurrà all'invenzione dei primi calcolatori elettronici. Gli studi di Alan Turing nel campo dell'elaborazione automatizzata rappresentano la base per gli sviluppi successivi: durante il secondo dopoguerra, le Università statunitensi realizzarono macchine dotate di elevate capacità di calcolo.¹²

Intorno agli anni '50-'60, ingegneri ed architetti hanno pertanto dovuto confrontarsi con una nuova serie di problemi derivanti dalle potenzialità delle nuove macchine e dei nuovi materiali, tra cui la possibilità di sperimentare nuove forme e strutture fluide, confluente

nella progettazione e realizzazione delle strutture a guscio, delle tensostrutture o dei sistemi pneumatici. Le superfici a doppia curvatura di Buckminster Fuller, di Pier Luigi Nervi, di Frei Otto, di Felix Candela e gli esperimenti di Eduardo Torroja rappresentano le celebri manifestazioni di tale approccio.

Negli anni '80, si assiste allo sviluppo e alla commercializzazione di computer dotati di notevoli capacità di elaborazione ed economicamente accessibili, destinati non solo per lo sviluppo di ricerche e di applicazioni di natura scientifica e accademica, ma rappresentanti un irrinunciabile supporto per diverse figure professionali, accessibile soprattutto grazie allo sviluppo di interfacce di tipo iconico.¹³

Il fenomeno della rivoluzione digitale ha favorito lo sviluppo di strumenti capaci di rendere possibile la diretta correlazione tra ciò che può essere progettato e ciò che può essere costruito, modificando l'iter di comunicazione delle informazioni necessarie per risolvere i problemi di produzione, di comunicazione, di applicazione e di controllo. I sistemi parametrici ed i calcoli algoritmici hanno favorito lo sviluppo di ricerche di carattere puramente formale e di nuovi materiali, e con essi la messa a punto di nuove tecnologie per l'ottimizzazione dei processi.

Non appena le forme hanno iniziato a complicarsi, è stato necessario abdicare in favore dei sistemi parametrici e dei calcoli matematico-algoritmici, i quali oggi rappresentano uno strumento irrinunciabile per la fattibilità delle opere,¹⁴ talvolta anche indipendentemente dal loro grado di complessità.

Tuttavia, non sono pochi gli architetti che restano ancora ancorati ad una visione "filosofico-astratta" dell'Architettura, rivolgendo l'attenzione prima al progetto e dedicandosi solo in un secondo momento alla gestione dei processi e delle tecniche necessarie per realizzarlo.

Non è un caso che, anche all'interno degli studi di architettura maggiormente impegnati nella progettazione di forme complesse, la figura dell'*enginnering expert* continua a rappresentare un *partner* irrinunciabile, talmente importante che, quasi sempre, il progettista affida completamente e ciecamente nelle sue mani il controllo della fase esecutiva dell'opera, perchè incapace di intervenire o di collaborare nella gestione e nell'ottimizzazione dell'intero processo.

Spesso accade che costruttori e produttori modifichino i progetti, o che i designer impongano condizioni e restrizioni sulla produzione,

il tutto al di fuori di una collaborazione consapevole: ciò produce talvolta conseguenze drammatiche sui costi totali e sulla sostenibilità del prodotto. Inoltre, il risultato è che molti progetti, a causa della loro complessità, restano sulla carta, mentre quelli realizzati devono essere semplificati o modificati, optando per l'uso di geometrie semplici per i quali esistono processi produttivi standardizzati, i cui risultati funzionali ed espressivi sono prevedibili o, peggio, incoerenti con le intenzioni iniziali del progettista.

Tuttavia, grazie allo sviluppo e alla crescente diffusione ed accessibilità dei nuovi strumenti digitali e tecnologici, che favoriscono la definizione di un nuovo linguaggio comune, è auspicabile un possibile superamento della separazione tra le varie figure coinvolte all'interno del processo decisionale. Pertanto, integrando la progettazione, l'analisi, la fabbricazione e l'assemblaggio di edifici con le tecnologie digitali, la collaborazione tra architetti, ingegneri e costruttori può ridefinire radicalmente le relazioni tra ideazione e produzione.¹⁵

Nel campo della realizzazione delle forme complesse, la soluzione risiede nello sfruttare e nel veicolare verso l'ottimizzazione dei processi le potenzialità della scienza e dello sviluppo tecnologico, coordinando e fondendo le conoscenze tecniche provenienti da diversi settori, tra cui la chimica, la biologia molecolare, l'informatica, la scienza dei materiali e da settori come l'aeronautica e il navale.¹⁶

Le nuove risposte avanzate dall'industria suggeriscono pertanto un necessario sviluppo di nuove competenze da parte di architetti e designer. Un architetto "tradizionale", infatti, raramente è in grado di affrontare e di gestire progetti dalla complessità molto elevata, con conseguenze talvolta disastrose. La conoscenza delle tecnologie *CAD*, *CAM*, *CAE* e *FEM* e dei nuovi materiali rientrano, pertanto, inevitabilmente tra i requisiti attualmente richiesti ad un architetto.¹⁷

Ritorna dunque necessario concepire la fase di progetto come un'attività multidisciplinare, come il frutto di un approccio sistemico. Non è infatti corretto parlare di specialismi o di specializzazioni, i quali rafforzano la separazione delle linee di confine che delineano le varie figure coinvolte nel processo. Piuttosto, è più corretto parlare di miglioramento delle conoscenze e delle competenze proprie di una determinata figura, sviluppabile già a partire dalla fase di formazione dei futuri professionisti allo scopo di favorire una crescita consapevole.¹⁸

3.2 L'Architectural Geometry: un settore multidisciplinare

La fantasia umana è certamente capace di evocare una sorprendente varietà di forme, ma è necessario trovare un equilibrio concreto tra la qualità complessiva del risultato ed i costi, di qualsiasi natura essi siano, affinché queste possano concretizzarsi.

Attualmente, la ricerca di soluzioni a questo specifico problema viene affrontata dagli avanzamenti condotti nell'ambito dell'*Architectural Geometry*.

L'*Architectural Geometry* è un settore di ricerca emergente che combina elementi di Matematica, di Geometria Computazionale, d'Informatica, d'Ingegneria e di Architettura.

Da sempre, gli architetti hanno preso in prestito gli approcci e le tecniche derivanti da altri settori, navale, automobilistico e aerospaziale, che per tale ragione possono dunque essere considerati complementari a quello architettonico.

Branko Kolarevic¹⁹ dimostra come gli architetti e i costruttori, da sempre, abbiano moltissimo da imparare dalla cantieristica di altri settori, ricordando una serie di esempi che da sempre testimoniano l'importanza di tale approccio:

Palladio ha progettato il tetto della Basilica di Piazza dei Signori a Vicenza (1617) come uno scafo di una nave rovesciata e ha coinvolto dei costruttori navali per realizzarlo;

Buckminster Fuller, per i suoi progetti della *Dymaxion House* (1946) e della *Dymaxion Car* (1933) ha optato per i metodi di produzione delle industrie aeronautiche e navali;

Future Systems ha realizzato il *Lord Media Centre* a Londra (1999) grazie ad una serie di segmenti di alluminio recuperati dallo scafo di uno yacht, essenziali per la produzione della struttura monoscocca in alluminio;

Frank Gehry ha rivestito la superficie curva della *DZ Bank AG* in Pariser Platz, Berlino (1997-2000) con delle lastre di acciaio inossidabile prodotte e installate da costruttori di barche e non avrebbe potuto realizzare il *Guggenheim Museum* di Bilbao senza il ricorso all'industria siderurgica.²⁰

E' soprattutto intorno alla Rivoluzione digitale, che ha inevitabilmente investito il campo dell'Architettura, che si sviluppa l'approccio olistico dell'*Architectural Geometry*. Utilizzando un metodo multidisciplinare,

gli approcci sviluppati all'interno di tale settore enfatizzano lo studio di problemi derivanti dalle interazioni complesse tra le loro parti costituenti.²¹

La sfida è riunire ricercatori provenienti da differenti ambiti disciplinari per affrontare la nascita di nuovi problemi o di questioni più complesse, attraverso la discussione dei continui progressi teorici e pratici raggiunti e proposti.²² La continua realizzazione di opere dotate di elevata complessità ha favorito notevoli sviluppi ed avanzamenti del settore, aumentandone la popolarità.

Il potenziamento e lo sviluppo di efficienti algoritmi di ottimizzazione e di strumenti *user-friendly*, concentrati sulla ricerca di continui progressi computazionali e tecnologici, rappresentano le sfide attualmente più sentite nel settore dell'*Architectural Geometry*.

Oggi, le ricerche nel campo della matematica applicata all'architettura contemporanea sono in crescita: le conferenze biennali *Advances in Architectural Geometry (AAG)* rilevano un incremento del numero di partecipanti dal 2008, anno del primo seminario, al 2014, anno in cui si è tenuto il più recente di questi incontri.²³

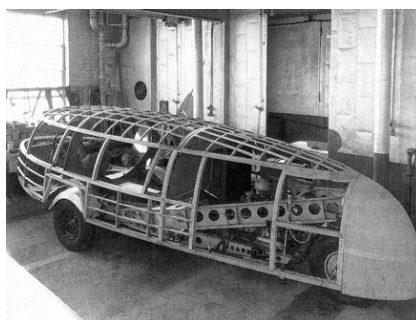
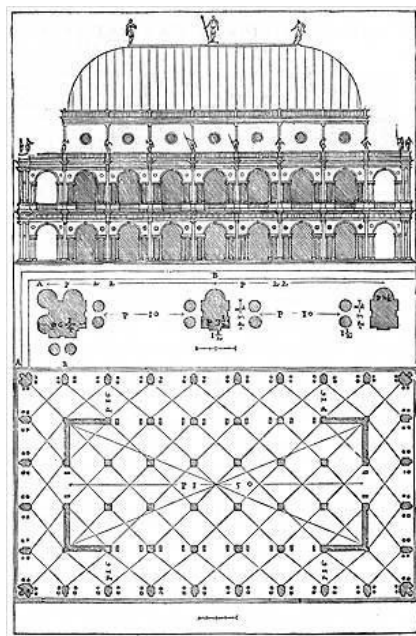
Tra gli altri gruppi coinvolti in questo ambito *SmartGeometry*, grazie all'organizzazione di workshop e di conferenze annuali rivolti a progettisti ed artigiani, promuove la diffusione e lo sviluppo di questi nuovi approcci, dalla progettazione fino alla produzione.

I contributi pubblicati all'interno degli atti di tali conferenze ed eventi, che si tengono in diversi paesi europei, confermano la natura pluridisciplinare del settore.²⁴

I *geometry experts*²⁵ e le altre figure coinvolte in questi gruppi di ricerca sfruttano le loro competenze matematiche, geometriche ed informatiche per risolvere problemi complessi legati a diversi *topics*, tra cui *Freeform curves and surfaces creation*, *Discretisation*, *Generative design*, *Digital prototyping and manufacturing*.²⁶

Non è un mistero che la geometria, oggi applicata ad un livello mai raggiunto prima, gioca da sempre un ruolo fondamentale per la ricerca di soluzioni ai problemi dell'Architettura.

Pertanto, la tendenza a spingere i progetti verso un elevato grado di complessità formale determina l'esigenza di programmi di insegnamento mirati e di conoscenze più profonde dei principi geometrici di base ed avanzati, di cui parte sono tradizionalmente insegnati all'interno dei corsi di geometria descrittiva e di disegno.



3.4 - La Basilica, ne I quattro libri dell'architettura, A. Palladio, 1540.

3.5 - Dymaxion car, R.B.Fuller, 1930

3.6 - Lord Media Center; Future Systems, 1999

La validità o la fattibilità delle soluzioni rappresentano le grandi sfide per le quali è necessario mettere a punto delle opportune strategie, ma per eccellere nell'utilizzo delle nuove tecnologie computazionali e parametriche è necessaria lo sviluppo di nuove competenze.

3.2.1 *Topic: paneling architectural free form surfaces*

Key words:

Discretisation - Developable surfaces - Digital prototyping and manufacturing

Helmut Pottman²⁷ definisce il processo di *paneling* “*an approximation of the design surface by a set of panels that can be manufactured using a selected technology at a reasonable cost, while respecting the design intent and achieving the desired aesthetic quality of panel layout and surface smoothness.*”²⁸

Dunque, “pannellizzare” una superficie significa approssimare il design di una superficie utilizzando diverse tipologie di pannelli, piani, curvi, o di entrambi i tipi, computando una soluzione che sia costruttivamente, economicamente ed esteticamente sostenibile.

Se si considera una superficie curva, indipendentemente dalla sua complessità, è noto che il metodo di discretizzazione da sempre ritenuto più semplice ed economico, oltre che sempre possibile, è quello di computare e di fabbricare un *pattern* di pannelli triangolari piani. Tuttavia, grazie all'evoluzione dei materiali, delle tecnologie, e delle capacità di calcolo, le forme che una volta erano fuori controllo, sia in termini di controllo geometrico, che di fattibilità economica, oggi riescono ad essere più facilmente realizzabili.²⁹

I sistemi di tassellazione delle superfici curve attraverso la distribuzione di elementi piani sono oggetto di continui studi, e mirano soprattutto al *clustering* (o raggruppamento) realizzazione di elementi tutti uguali tra loro.

Tuttavia, i sistemi composti da tasselli piani, indipendentemente dal *pattern* di distribuzione, determinano un aspetto sfaccettato della superficie curva originaria, conseguenza che si traduce principalmente in effetti di riflessione e di rifrazione discontinue dell'ambiente circostante, talvolta alterando le intenzioni morfologico-espressive dell'architetto. Una soluzione più coerente è sicuramente raggiungibile utilizzando dei pannelli curvi, ma i costi di realizzazione di

pannelli a doppia curvatura sono elevatissimi.

Tra le figure principali per lo sviluppo di questo *topic* emerge quella del prof. Helmut Pottmann (King Abdullah University of Science and Technology - Institute of Discrete Mathematics and Geometry Vienna University of Technology), che lavora alla sperimentazione di soluzioni tecnologiche avanzate nel campo del *surfaces paneling*.

ARC, Architectural Freeform Structures from Single Curved Panels,³⁰ è un progetto messo a punto per la realizzazione di strumenti utili per ottimizzare la progettazione e la fabbricazione di superfici complesse mediante la distribuzione di pannelli curvi; più precisamente, i principali partner coinvolti nel progetto *ARC* sono Evolute GmbH, il Politecnico di Vienna ed RFR Group.

La poetica che li accomuna è unire le competenze ed i linguaggi diversi, propri di questi settori, verso un obiettivo comune: razionalizzare una superficie *free form* assemblando porzioni di superfici sviluppabili, o comunque rigate, per ridurre i costi di produzione ed ottimizzando la fabbricazione e la qualità estetica delle superfici.

Evolute GmbH³¹ è un gruppo di *geometry experts* composto da matematici, informatici ed architetti, la cui società, fondata nel 2008, rappresenta una realtà capace di fornire servizi e software di carattere matematico-geometrici, ed è una *spin-off* della Vienna University of Technology. Il gruppo realizza e pubblica ricerche *high-tech*, servizi di *consulting* e strumenti rivolti a tutte le figure che affrontano le sfide legate allo studio ed alla realizzazione di architetture complesse.

Attualmente, Evolute offre una gamma di potenti strumenti per la razionalizzazione di superfici complesse, tra cui *Evolute Tools Pro* ed *Evolute Tools Lite*.

L'Istituto di Matematica Discreta e Geometria dell'Università di Vienna, in collaborazione con altre realtà accademiche, esegue delle ricerche concentrate sui problemi di ottimizzazione delle forme complesse, studiando soluzioni basate sui principi della geometria discreta, differenziale e computazionale. Tra le figure di maggiore importanza impegnate in questa ricerca si citano il professor Alexander Bobenko (TU Berlin), il professor Niloy Mitra (KAUST - Arabia Saudita e University College di Londra, Regno Unito), il professor Johannes Wallner (TU di Graz).

RFR,³² fondata nel 1982 da Sir Peter Rice, è un'azienda che gode di fama mondiale nel campo della progettazione ed ottimizzazione

di strutture, di facciate e di involucri complessi, avvalendosi di una vasta gamma di competenze in ingegneria, architettura e design industriale. Tra le sue realizzazioni troviamo la nota *Pyramide inversa* del Musée du Louvre, la stazione metropolitana di Saint Lazare, nota come la *lentille*, il *Terminal 2F* dell'aeroporto Charles de Gaulle, le superfici progettate da Frank Ghery per la *Fondation Louis Vuitton*, le facciate dei tre nuovi padiglioni realizzati per la ristrutturazione del primo piano della Torre Eiffel, oggetto di approfondimento e di osservazioni del settimo capitolo, il *Musée de la Dentelle*, la stazione di Avignone e la stazione *TGV* di Strasburgo.

Dalla collaborazione tra Evolute GmbH e RFR, è nata una nuova società, *Bform Tech - Technologie bform*.³³ ancora una volta, l'obiettivo del progetto è quello di fondere la progettazione, l'ingegneria e il rigore matematico al fine di fornire strumenti che consenta ai progettisti ed agli architetti di spingere i confini della forma, delle strutture e dei materiali utilizzati.

Lo scopo del *topic* indagato è dunque quello di progettare, di controllare e di verificare i processi di *paneling* delle superfici: questo processo, è in letteratura, meglio noto con il termine “riassuntivo” di “razionalizzazione”. Attraverso calcoli ricorsivi, il processo di razionalizzazione mira all'ottimizzazione della geometria di un modello per controllare il dettaglio ed i relativi costi inerenti la produzione dei pannelli. In particolare, il principale obiettivo della *ARC* consistette nello sviluppo di metodi e di algoritmi per la produzione e per l'uso ottimizzato di pannelli a singola curvatura, in quanto più semplici da realizzare e, al tempo stesso, capaci di generare l'effetto di continuità delle superfici curve, offrendo un buon compromesso tra le intenzioni progettuali ed i costi di produzione di tali superfici.³⁴ Parte di queste ricerche sono state presentate al *SIGGRAPH*, *Special Interest Group* sulla grafica e le tecniche interattive,³⁵ una conferenza annuale sulla *computer grafica* che rappresenta il più prestigioso canale per la divulgazione di ricerche per la computer grafica ed i settori correlati.³⁶ Il progetto *ARC*, inoltre, si sta ora dirigendo verso la ricerca di soluzioni tecnologiche che possono essere di grande rilevanza per il settore delle costruzioni navali, il quale rappresenta una nuova area applicativa per le società coinvolte.³⁷

L'esperienza condotta da questi gruppi dimostra quanto oggi sia necessario colmare il divario tra il mondo accademico ed i settori

produttivi. Questo suggerisce l'importanza di promuovere dei partenariati tra l'industria, i centri di ricerca specializzati e le Università.³⁸ Un tentativo di applicazione di tale approccio è dimostrato attraverso la trattazione di un'esperienza concreta all'interno dell'ottavo capitolo.

3.3 Il controllo della forma: *il design computazionale*.

Dai primi anni Novanta fino all'inizio del nuovo millennio, l'architettura ha dunque attraversato un periodo di forte accelerazione creativa.

*“Dalla rappresentazione che applicava le regole della rappresentazione geometrica sui piani mongiani o delle simulazioni spaziali assonometriche e prospettiche, oggi si è giunti alla costruzione di modelli digitali di architetture costruite e costruibili. E' in particolare su queste ultime che viene posta l'attenzione.”*³⁹

La diffusione di elementi prefabbricati, la necessità di ridurre le quantità di pezzi speciali, le restrizioni economiche e la necessità di progettare un ciclo di vita sostenibile per l'edilizia impongono lo sviluppo di nuove competenze da parte dell'architetto. Il design computazionale è lo strumento che rende consapevole la progettazione digitale.⁴⁰

Attualmente, gli algoritmi rappresentano gli strumenti necessari per risolvere i problemi legati al *paneling* di forme complesse e, grazie alla loro trasposizione in elementi visualizzabili e personalizzabili, rappresentano uno strumento accessibile anche per gli architetti e per i designer.

Tuttavia, all'interno dei *papers* dedicati al *topic* del *paneling*, molto spesso, i principi geometrici di base su cui si fondano le teorie complesse e le conseguenti applicazioni non vengono puntualmente richiamati, oppure vengono presentati attraverso la forma implicita dei linguaggi matematico ed informatico. Inoltre, la maggior parte delle pubblicazioni dedicate allo sviluppo dei topics che strutturano il settore emergente dell'*Architectural Geometry* sono esclusivamente in lingua inglese, e sono realizzati soprattutto da matematici o da informatici che lavorano sull'integrazione tra le loro discipline di appartenenza e sulle possibili applicazioni e ricadute in architettura. Questo rende necessaria la sistematizzazione dei principi geometrico – matematici

posti alla base dei principali algoritmi utili per la risoluzione del problema: la Geometria Descrittiva è la disciplina adatta per esplicitare e rappresentare tali contenuti.

E' sicuramente necessario constatare che la questione ha favorito lo sviluppo e la diffusione di software avanzati e di relativi "tutorial esplicativi", basati su sistemi accessibili a tutte le figure coinvolte nel processo.⁴¹

I nuovi applicativi sono appositamente studiati per interfacciarsi con le attuali logiche produttive, per rispondere alle attuali necessità del mercato (cfr. cap II), consentendo la creazione di modelli contenenti tutti i dati e le informazioni necessarie per la fase realizzativa, i quali sono direttamente trasferibili alle macchine a controllo numerico. Inoltre . questi strumenti consentono simulazioni e verifiche di carattere strutturale, ambientale ed energetico.⁴²

*Il modello digitale, in questi casi, diventa una simulazione dell'oggetto edilizio.*⁴³ Oggi la popolarità degli strumenti algoritmico-generativi e la diffusione delle informazioni, favorite dall'organizzazione di workshop e di tutorial on line, è cresciuta esponenzialmente e gli utenti possono accedere liberamente ai contenuti e possono usufruire di una vasta gamma di strumenti *open source*, approcciando in maniera consapevole alle nuove tecnologie.

L'affermazione della cultura del *design* digitale, di fatto, si conclude negli anni Novanta, ed è principalmente rappresentata dallo sviluppo di software di animazione per generare forme complesse, cambiando per sempre il modo e lo spazio viene percepito, progettato e comunicato.

La rivoluzione digitale ha determinato la nascita di nuovi stili e se il Disegno rappresenta un mezzo a servizio dell'architettura, i nuovi stili, a loro volta, impongono lo sviluppo e la gestione di nuovi strumenti.⁴⁴

A tale proposito è utile indagare gli appositi strumenti digitali, o *digital tools*, attualmente forniti dai modellatori parametrici attualmente più diffusi. I nuovi strumenti computazionali consentono di affrontare con rigore, mediante approcci algoritmici, il problema della realizzazione fisica di superfici architettoniche curve e complesse.

Un algoritmo viene generalmente descritto come un procedimento per la risoluzione di un problema. Il termine "algoritmo" deriva dalla trascrizione latina del nome del matematico persiano al-Khwariz-

mi,⁴⁵ considerato uno dei primi autori ad aver fatto riferimento a questo concetto.

Nel secolo scorso, David Hilbert⁴⁶ formalizza il concetto di algoritmo come strumento capace di risolvere il problema matematico della "decisione" (*Entscheidungs problem* – 1928). Se questa idea aveva già una certa importanza per il calcolo matematico, è con l'informatica che il termine "algoritmo" ha iniziato a diffondersi.

Un algoritmo è dunque una sequenza ordinata e finita di *steps* elementari, cioè non ulteriormente scomponibili ed univocamente interpretabili. Un algoritmo richiede una quantità finita di dati in ingresso (input) e l'esecuzione deve portare ad un risultato univoco (output) in un tempo finito. Per ogni passo compiuto all'interno di un algoritmo, il successivo deve essere uno e uno solo. E' preferibile che gli algoritmi siano "modulari", ovvero orientati a risolvere specifici sotto-problemi, e distribuiti secondo una specifica gerarchia appositamente strutturata allo scopo di rispondere ad un determinato problema.

Particolare rilevanza teorica in tale ambito assume il teorema di Böhm-Jacopini, che afferma che qualunque algoritmo può essere implementato utilizzando tre strutture: la sequenza, la selezione e il ciclo (iterazione), da applicare ricorsivamente alla composizione di istruzioni elementari.⁴⁷ Graficamente, un algoritmo è, dunque, descritto da un diagramma di flusso. Tale diagramma è successivamente tradotto, ad opera di un programmatore, in linguaggio di programmazione e quindi in linguaggio macchina, dando così vita al programma che sarà eseguito dal calcolatore. Per comunicare al computer una serie di istruzioni viene utilizzato un editor specifico. Gli editor possono essere applicazioni indipendenti, oppure possono essere inserite all'interno di un software e permettono la scrittura d'istruzioni per automatizzare le attività. La costruzione di una geometria, ad esempio, può avvenire mediante la definizione di una sequenza algoritmica: secondo questo approccio, una linea è definita a partire da due punti, definiti a loro volta dalle rispettive coordinate. Ciò significa che la linea non viene "tradizionalmente" tracciata all'interno dello spazio virtuale, ma deriva dall'associazione e dalla sequenza di una serie di azioni che ne traducono gli steps che ne definiscono la genesi geometrica. Maggiore è la complessità dell'oggetto geometrico che si vuole realizzare, maggiore sarà la complessità

nel tradurre le relazioni che definiscono i diversi *steps*, il cui numero solitamente tende inevitabilmente ad aumentare. La possibilità di stabilire delle relazioni associative tra oggetti diversi, come i numeri, le primitive geometriche e dati di diverso genere, genera forme senza precedenti, le quali derivano dal coinvolgimento di molteplici parametri di input. Pertanto, la progettazione algoritmica consente ai progettisti di trovare nuove soluzioni superando i limiti dei tradizionali sistemi *CAD*. Secondo tale logica, gli oggetti sono generati attraverso delle procedure espresse in un linguaggio di programmazione specifico: tale operazione è detta *scripting*.

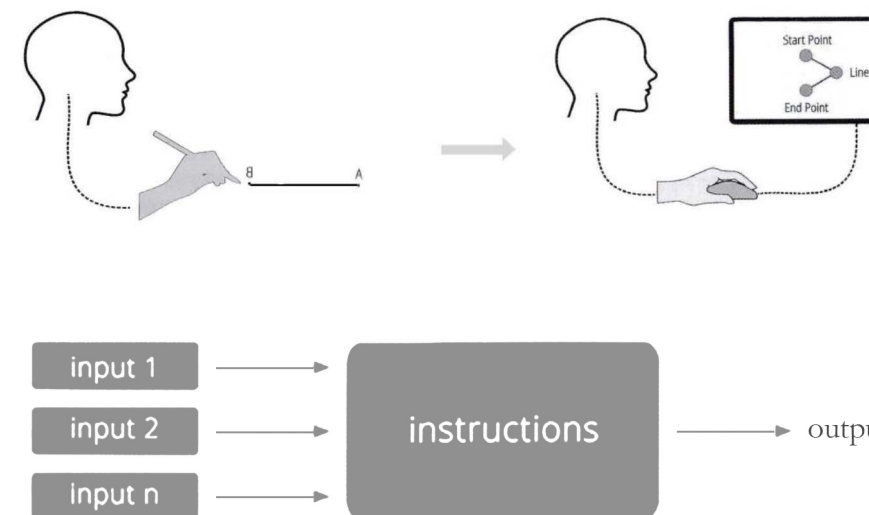
Tra i programmi di *scripting* è possibile citare *Autolisp* in *Autocad*, *Rhinoscript* in *Rhinoceros*, *MEL* in *Maya* e altri linguaggi di programmazione, tra cui *Python*. Tale processo genera un modello digitale interattivo, in cui la variazione dei dati di input manipolano l'intero sistema. Recentemente, diverse case produttrici di software hanno sviluppato degli strumenti visuali per rendere lo scripting accessibile a qualsiasi utente, basati su metodi grafici strutturati attraverso sequenze, o diagrammi, composti da nodi e connessioni, facilitando così tale compito soprattutto agli architetti e ai designers.

Tra i *tools* attualmente disponibili, se ne citano alcuni:⁵⁰

- *K3Dsurf*,
software per visualizzare e manipolare modelli matematici in tre, quattro, cinque e sei dimensioni;
- *JavaView*,
software per la visualizzazione matematica di geometrie 3D
- *Generative Components* (Bentley Systems),
software per il design generativo
- *Grasshopper* (Robert Mc Neel & Associates),
Editor di algoritmi grafici presente tra i *plug-in* di *Rhinoceros*, consente lo sviluppo e la combinazione di *apps* sviluppate *ad hoc*, continuamente aggiornate e create per permettere la risoluzione di problemi specifici.

Questi strumenti permettono agli utenti di computare geometrie complesse (output) mediante l'associazione di geometrie e di dati semplici (input).⁵¹ Negli ultimi anni sono stati pubblicati diversi manuali di supporto per l'uso di questi *digital tools*.⁵² Grazie alla diffusione di numerosi *plug-in*, in commercio o *open source*, indipendenti o concepiti come strumenti aggiuntivi, sono ad oggi disponibili dei

semplici componenti che, al loro interno, contengono appositi algoritmi e formule matematiche per lo sviluppo di diverse azioni virtuali da compiere sugli oggetti digitali.



In particolare, le applicazioni, i casi studio e le sperimentazioni riportate all'interno di questo studio sono stati indagati e realizzati attraverso l'uso del software *Rhinoceros*, unitamente ai *plug-in* *Grasshopper* (*open source*) e *Evolute Tools Pro*.

Grasshopper, strumento utilizzato principalmente per costruire algoritmi generativi, si avvale di un linguaggio di programmazione visuale sviluppato da David Rutten e Robert McNeel & Associates, capace di trasformare le operazioni di scripting di un codice in una serie di atti visuali.⁵³

Evolute Tools Pro è un *plug-in* dotato di un insieme di strumenti per il paneling e per l'ottimizzazione di superfici complesse.⁵⁴

Scopo della ricerca è trattare il tema del *paneling* di superfici complesse tanto dal punto di vista teorico, quanto da quello pratico, indagandone i principi geometrici di base, le modalità attraverso cui esso si manifesta ed i diversi ambiti di applicazione.

Note

¹ R. Florio, *Origini, evoluzioni e permanenze della classicità in architettura. Un'esperienza*

di conoscenza. *Disegno e rappresentazione dell'architettura*, Officina Edizioni, 2004, p.18

² *Ibidem*

³ L'Universale, Architettura, volume I, 2004, p.47

⁴ D. Galasso, Villard de Honnecourt. La rivoluzione strutturale del medioevo, Archigrafica, 2008, p.9.

⁵ G. Galilei, *De revolutionibus orbium coelestium*, 1543

⁶ I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 1687

⁷ *Il pensiero nell'età del progresso. Il positivismo* - autore sconosciuto

⁸ *Ibidem*

¹⁰ Benoit Mandelbrot (1924-2010), è il fondatore di ciò che oggi viene chiamata geometria frattale.

¹¹ La teoria delle catastrofi, di René Thom (1923-2002), matematico e filosofo francese, studia i modelli matematici di fenomeni discontinui causati dalla continua variazione dei parametri da cui dipendono.

¹² cfr. M. Campi, *L'indagine multimediale della forma. Dal lessico geometrico alle simulazioni previsionali per la rappresentazione dell'Architettura*, Editrice Gaia, 2007, p. 10

¹³ *Ibidem*

¹⁴ cfr. L. Hesselgren, S. Sharma, J. Wallner, N. Baldassini, P. Bompas, J. Raynaud, *Foreword in Advances in Architectural Geometry 2012*, Springer-Verlag/Vienna New York, pp.7-9 e pp. 13-22

15 cfr. B. Kolarevic, *Architecture in the digital age*, 2003

¹⁶ I. Paoletti, *Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura*, Libreria CLUP, Milano, 2006

¹⁷ *Ibidem*

¹⁸ Mario Lo Sasso (2014), AA.VV. *The Electronic Muse*, Diarc, Napoli, 16 Dicembre 2014

¹⁹ cfr. B. Kolarevic, *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, Editore Spon Press, 2003

²⁰ *Ibidem*

²¹ *AAG - Conference Proceedings*, SpringerWienNewYork, 2008-2010-2012-2014

²² cfr. H.Pottmann, A. Kilian, M.Hofer, *Advances in Architectural Geometry 2008*, Springer-Verlag/WienNew York, 2008, pp.3-4

²³ I seminari *AAG* si sono svolti con scadenza biennale: 2008 (Vienna, 13-16 settembre) – 2010 (Vienna, 18-21 settembre) – 2012 (Parigi, 27-30 settembre) - 2014 (Londra, 18-21 settembre)

²⁴ *Architectural Geometry*, http://en.wikipedia.org/wiki/Architectural_geometry

25 <http://www.evolute.at/company-en/staff.html>

²⁶ C. Ceccato, L. Hesselgren, M. Pauly, A. Schiftner, H. Pottmann, J. Wallner, *Advances in Architectural Geometry 2010*, Springer-Verlag/Vienna New York, 2010,

pp.5-6

²⁷ Helmut Pottmann, dal 2009, è direttore del GMSV, Centro di ricerche presso l'Università Re Abdullah di Scienze e tecnologia (KAUST) in Arabia Saudita - <http://www.evolute.at/company-en/staff.html>

²⁸ M. Eigensatz, M. Deuss, A. Schiftner, M. Kilian, N. J. Mitra, H. Pottmann, M. Pauly, *Case Studies in Cost-Optimized Paneling of Architectural Freeform Surfaces* - Abstract

²⁹ B. Vaudeville, M. King, S. Aubry, J. Raynaud, M. Chalaux, A. Witt, *How Irregular Geometry and Industrial Process Come Together: A Case Study of the "Fondation Louis Vuitton Pour la Creation"*, Paris, in *Advances in Architectural Geometry 2012*, p.280

³⁰ *Optimised building. ARC, International innovation* – Disseminating science, research and technology, 2013, p. 5

http://www.geometrie.tuwien.ac.at/ARC/27_Helmut_Pottmann_Brochure_01.pdf

³¹ <http://www.evolute.at>

³² RFR Group | Paris, Stuttgart, Shanghai - <http://www.rfr-group.com>

³³ *Optimised building. ARC, International innovation* – Disseminating science, research and technology, 2013, p. 4

³⁴ *Ibidem*, p. 2

³⁵ *ACM Siggraph* - <http://www.siggraph.org/>

³⁶ *Optimised building. ARC, Op. cit.*, p. 3

³⁷ *Ibidem*

³⁸ *Ibidem*

³⁹ M. Campi, *L'indagine multimediale della forma. Dal lessico geometrico alle simulazioni previsionali per la rappresentazione dell'Architettura*, Editrice Gaia, 2007, (retro copertina)

⁴⁰ A. Tedeschi, *AAD_Algorithms – Aided Design*, Le Penseur Publisher, 2014, pp.15-30

⁴¹ *Ibidem*

⁴² I. Paoletti, S. Converso, *Da Gehry... in avanti*, http://ftp2.bentley.com/dist/collateral/docs/press/Da-Gehry-in-Avanti-Modulo_IT.pdf, p. 513

⁴³ *Ibidem*, p. 513

⁴⁴ *Optimised building. ARC, Op. cit.*, p. 1-5

⁴⁴ <http://it.wikipedia.org/wiki/Algoritmo>

⁴⁵ Muhammed Ibn Mūsā al-wārizmī, *Algoritmi de numero Indorum*, a cura di B. Boncompagni, Roma, 1857

⁴⁶ J. Stovicek, *Axioms, algorithms and Hilbert's Entscheidungsproblem*, Department of Mathematical Sciences, NTNU, Norwegian University of Science and Technolo-

gy, settembre 2009, pp. 4-7 - www.ntnu.no

⁴⁷ C. Bohm, G. Jacopini, *Flow Diagrams, Turing Machines and Languages with Only Two Formation Rules* in Communications of the ACM, vol. 9, n° 5, maggio 1966, pp. 366–371

⁴⁸ R. Visconti, *Gli algoritmi, in Compendio di Informatica* – capitolo 2, da Compendio di Informatica, Edizioni Calderini, Bologna, 1988 (anno di revisione 2103)

⁴⁹ A. Tedeschi, *Op. cit*, pp. 9-11

⁵⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/Architectural_geometry

⁵¹ A. Tedeschi, *Op. cit*, pp. 25-30

⁵² Segue un elenco di parte dei manuali dedicati al *plug-in Grasshopper (Rhinceros)*: A. Payne, R. Issa, *Grasshopper Primer*, for version 0.6.0007, edizione italiana a cura di A. Cremaschi, A. Innocenti, 2009

(ebook - <http://www.liftarchitects.com/blog/2009/3/25/grasshopper-primer-english-edition>);

Woo Jae Sung, *Rhino Grasshopper Tutorial*, (ebook - www.woosung.com), 2009;

A. Tedeschi, *Architettura Parametrica. Introduzione a Grasshopper*, Leenseur Publisher, 2010;

Z. Khabazi, *Algoritmi generativi con Grasshopper*, (ebook - <http://grasshopperresources.blogspot.it/2011/02/algoritmi-generativi-by-zubin-khabazi.html>), edizione italiana a cura di A. Marsala, 2011;

A. Tedeschi, *AAD_Algorithms – Aided Design*, Leenseur Publisher, 2014

⁵³ A. Nebuloni, M. Romero, G. Vignati, Alberto Giacomelli, Antonio La Marca, *Responsive Morphologies*, Politecnico di Milano- Scuola di Architettura e Società - Scienze dell'Architettura- 22 settembre 2014

⁵⁴ www.evolute.at

PARTE SECONDA

INDAGINE E SISTEMATIZZAZIONE: DAI PRINCIPI ALLE TECNICHE

Paneling & Digital Fabrication

Una regola giapponese dice: la perfezione è bella, ma è stupida, bisogna conoscerla, usarla, ma romperla.

Bruno Munari

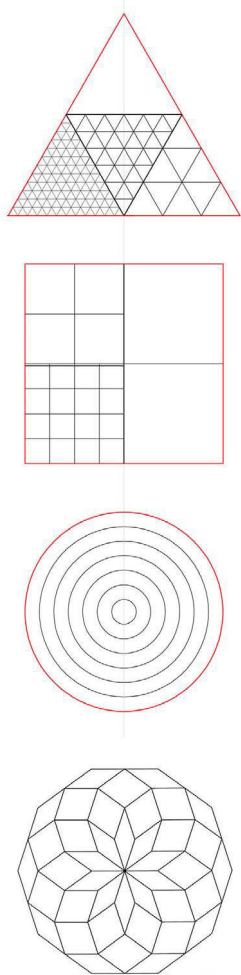
4.1 Sistemi regolari vs sistemi casuali: ordine e caos

Gli antichi, nel progettare le loro opere, miravano alla composizione di un ordine regolato da leggi fondate sui rapporti armonici tra le parti ed il tutto.¹

La modularità è, da sempre, uno degli obiettivi più ambiti per la scomposizione di un sistema, indipendentemente dalla sua complessità: la produzione industriale tende inevitabilmente alla realizzazione e all'impiego di elementi modulari, i quali favoriscono l'ottimizzazione delle fasi di fabbricazione e di assemblaggio dei prodotti finali. Pertanto, lo scopo della ricerca è quello di tracciare un percorso metodologico per interpretare e gestire la complessità attraverso diverse possibili combinazioni distributive di forme semplici.

Da sempre, la natura rappresenta una ricca fonte d'ispirazione per la ricerca di soluzioni: la regolarità delle simmetrie spaziali che determinano la struttura dei cristalli e dei radiolari hanno ispirato le proposte originali di diversi studiosi, tra cui M. C. Escher e B. Fuller, anticipando ricerche tra le più recenti.²

La divisione regolare del piano rappresenta la fonte di ispirazione più ricca per le produzioni di Escher. Le geometrie degli arabeschi, decorazioni di pareti e pavimenti con pezzi di maiolica colorati e mutuamente assemblati, hanno stimolato le sue ricerche sulle tassellazioni cicliche, scaturite nella produzione di *pattern* di diversa complessità.³



4.3 - Modularità del triangolo, del quadrato e del cerchio.

4.4 - Esempio di *Mandala*.

“Se si vuole riuscire a rappresentare la simmetria su una superficie piana, bisogna tener conto di tre principi fondamentali della cristallografia: traslazione, rotazione e riflessione.”⁴

Le proiezioni piane delle simmetrie spaziali dei poliedri sfociano negli omeomorfismi, da cui derivano forme apparentemente disordinate, ma in realtà determinate da permutazioni regolari e da geometrie frattali. Dunque, ciò significa che la reiterazione di forme semplici può generare geometrie complesse, riproducibili e gestibili attraverso delle elaborazioni di tipo automatico: è proprio da tale approccio che prende ispirazione parte degli esperimenti formali dell'Architettura Decostruttivista.⁵

Regolarità e modularità favoriscono la creazione di sistemi componibili prefabbricati attraverso i quali comporre diverse soluzioni figurative. L'ambiente che ci circonda è carico di esempi di sistemi modulari: trame di tessuti, piastrellature, griglie e maglie metalliche.⁶ Indagando la questione dal punto di vista geometrico, le forme modulari dalle quali è possibile generare tutte le altre figure sono il cerchio, il triangolo ed il quadrato.⁷ In una struttura modulare gli elementi, talvolta, presentano la stessa forma della figura generatrice, ma dimensioni inferiori: il modulo, in questo caso, può quindi essere considerato come un “sottomultiplo della forma”: esso è invariabile, ripetibile e capace di generare strutture componibili. Due figure geometricamente simili hanno la stessa forma e possono differire solo per dimensioni ed orientazione; se esse sono uguali, saranno geometricamente congruenti e potranno essere distinte solo in base alla loro orientazione. A differenza del quadrato e del triangolo, meno chiaramente definibile è la struttura modulare del cerchio.⁸

I *Mandàla*, termine derivante dal sanscrito mandala, che letteralmente significa *essenza (manda)* e *possedere* o «contenere» (*la*)⁹ rappresentano dei diagrammi circolari costituiti, di base, dall'associazione di diverse figure geometriche: le più usate sono proprio il punto, il triangolo, il cerchio ed il quadrato.

Tuttavia, quando la complessità della forma, che sia essa piana o curva, aumenta, frammentare il continuo mediante elementi modulari rappresenta una soluzione lineare al problema che chiaramente contrasta con la natura complessa, dunque “non lineare” del supporto. Tra le tecniche di frammentazione del continuo, è utile richiamare, in maniera sintetica, l'arte musiva.

Un mosaico è una tecnica artistica e decorativa che consiste nel cre-

are dei motivi geometrici o figurativi accostando piccoli pezzi di materiale lapideo e vitreo.

Permette di rivestire superfici anche di grandi dimensioni, piane e curve, oltre che sculture e oggetti tridimensionali.

Osservando le numerose opere musive prodotte nei secoli, si osserva che ciascuna delle tessere può rappresentare un modulo, e quindi può essere riprodotta seguendo la stessa forma, ma non necessariamente la stessa dimensione, oppure può presentare una forma irregolare.¹⁰

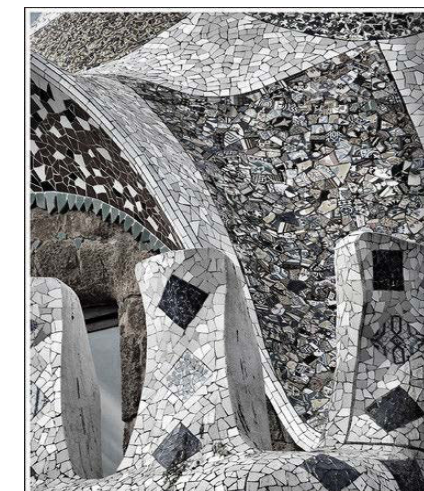
La geometria della superficie da rivestire o da suddividere influenza in maniera sostanziale la fattibilità dell'operazione e la qualità del risultato: le superfici piane e le superfici di rotazione e di traslazione consentono di ricavare più semplicemente dei sistemi discreti (cfr. cap. VI).

Nel XX secolo si assiste ad una rinascita dell'arte musiva applicata all'architettura. Se nei mosaici più antichi, la distribuzione delle tessere segue dei reticoli geometrici regolari, in quelli successivi essa tende ad un andamento di tipo figurativo, manifestandosi attraverso forme curvilinee ed irregolari.¹¹

Nel Novecento, Antoni Gaudì esprime la propria poetica anche attraverso l'uso del mosaico ricoprendo le superfici delle sue opere con pezzi di ceramica variopinta. Nella *Sagrada Família* e nel *Parc Güell* di Barcellona, l'architetto catalano propone delle nuove soluzioni decorative applicando l'antica tecnica moresca del mosaico di maiolica, nota come *tracandis*, un particolare taglio dei singoli frammenti ceramici giocato sull'irregolarità. In particolare, i suoi mosaici di *Casa Batlló* (1904-1906) e di *Casa Milà* (1906-1912) rivestono forme organiche con tasselli irregolari di ceramica vitrea colorata.¹²

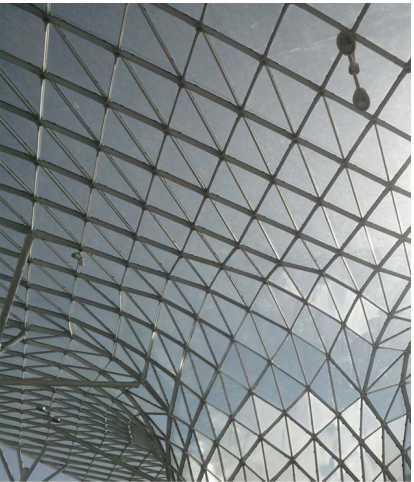
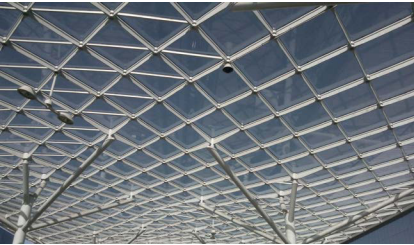
L'uso di tessere dalle dimensioni ridotte consente di ricoprire le superfici senza limitare l'espressività e la continuità delle forme progettate. Oggi, il linguaggio musivo trova espressione nelle sperimentazioni di diversi esponenti dell'architettura neo-eclettica italiana, di cui Alessandro Mendini e Lucio Fontana rappresentano alcuni degli esponenti.¹³

Quando la superficie da ricoprire è di grandi dimensioni, ed è pertanto necessario abbassare i tempi ed i costi di riproduzione, è possibile ricorrere alla produzione di mosaici industriali.¹⁴ Com'è banalmente osservabile nell'ambiente che ci circonda, tutte le tessere di un sistema modulare sono solitamente prefabbricate, mentre le



4.5 - *Parc Güell* (A. Gaudì - 1914). Particolare. I mosaici rivestono forme organiche con tasselli irregolari di ceramica vitrea.

4.6 - *Casa Milà*, (A. Gaudì). Particolare



4.7 - Le tessere di un sistema modulare sono solitamente prefabbricate, mentre le cosiddette tessere “di snodo” o “di raccordo”, sono invece tagliate secondo delle forme particolari, spesso triangolari, per seguire la curvatura e le irregolarità del supporto da rivestire.

4.8, 4.9 - La Nuova Fiera di Milano, M. Fuksas, 2005. Le immagini mostrano la variazione della geometria dei tasselli nei punti al variare della curvatura della superficie.

cosiddette tessere “di snodo” o “di raccordo”, sono invece tagliate a mano secondo delle forme particolari, spesso triangolari, per seguire la curvatura e le irregolarità del supporto da rivestire. Se nell’arte musiva, il rapporto con l’industria rappresenta per molti una limitazione al carattere artistico-artigianale dell’opera, in architettura, la messa a sistema di geometria, arte, tecnologia ed industria favorisce lo sviluppo di nuove tecniche di discretizzazione e di nuovi sistemi di produzione, che a loro volta favoriscono la sperimentazione di nuovi materiali. Dal punto di vista estetico - formale, è inoltre importante che il sistema discreto aderisca il più possibile alla forma originaria dell’oggetto da produrre, favorendo la coerenza tra le intenzioni del progettista ed il manufatto realizzato. In conclusione, la regolarità del *pattern* e la semplicità dei nodi di giunzione tra gli elementi che compongono il sistema rappresentano due presupposti fondamentali per ottimizzare i processi di fabbricazione e di assemblaggio.

4.2 *Paneling* alla piccola, media e grande scala

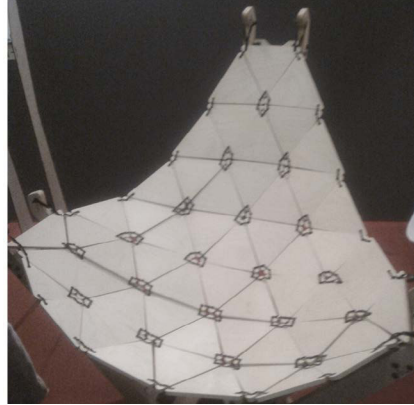
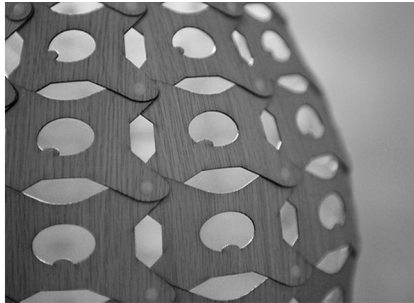
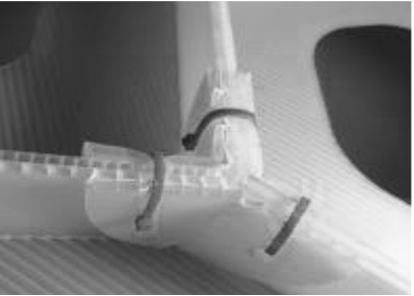
“Pannellizzare” una superficie significa trasformare una superficie in un sistema di pannelli, piani, curvi, o di entrambi i tipi. Tale sistema può essere composto da elementi uguali per geometria e per dimensione, oppure differenti l’uno dall’altro, generando soluzioni distributive più o meno regolari. E’ possibile definire la maggiore o minore “funzionalità” di un *pattern* in funzione della scala architettonica dell’oggetto da realizzare: è sufficiente pensare che un oggetto destinato alla grande scala, oltre ad essere composto da un numero elevato di elementi, deve essere in grado di rispondere a specifici requisiti strutturali, costruttivi ed economici, oltre che estetici. Di contro, se l’oggetto da realizzare è di piccole dimensioni, è evidente che per la sua discretizzazione è possibile sfruttare dei *pattern* non necessariamente regolari, in quanto sia il quantitativo di tasselli da fabbricare e da assemblare, sia la funzione a cui l’oggetto è destinato sono sicuramente limitati rispetto a quanto accade per un oggetto architettonico di media e grande scala. Pertanto, il carattere scultoreo di tali oggetti non necessita dello sviluppo di prestazioni strutturali e costruttive avanzate: molto spesso,

i sistemi di assemblaggio degli elementi convergono in delle originali, improvvisate soluzioni “artigianali”, generate dalla creatività dei *designer* e dei *makers*. Pertanto, alla luce di tali riflessioni, l’esigenza di soluzioni che consentano l’ottimizzazione e la sostenibilità dei processi di realizzazione di involucri, coperture e facciate di forma complessa, suggerisce l’analisi e la schedatura di un campione di architetture “pannellizzate” esistenti e appartenenti alla media ed alla grande scala architettonica.

4.3 Analisi di un campione: schede e grafici riassuntivi

*“Non si devono avere preconcetti, idee fisse, modelli preferiti, stili da perpetuare. Tutte queste cose frenano la libera manifestazione della creatività. Come per la ricerca e la sperimentazione che non devono essere finalizzate fino a che non si conoscano tutti i risultati. Dopo possono essere finalizzati questi risultati, ma non prima.”*¹⁵

L’osservazione e la schedatura di un campione di 80 casi di architetture di forma complessa, appartenenti alla media e grande scala, hanno consentito di riconoscere le qualità e le criticità dei diversi sistemi di razionalizzazione impiegati. Le schede realizzate rappresentano uno strumento di analisi capace di favorire il confronto tra tutti gli elementi che si ritiene utile osservare ai fini della ricerca, individuando le tematiche che necessitano di maggiori approfondimenti e sperimentazioni. Da un punto di vista metodologico sono stati individuati e codificati gli indicatori necessari per la sistematizzazione dei diversi sistemi di *paneling* caso per caso adottati. Pertanto, sono state utilizzate delle icone sintetiche, il cui significato è opportunamente esplicitato all’interno di un’apposita legenda. La schedatura ha consentito di ricavare dei dati fondamentali per l’impostazione della ricerca. I grafici riassuntivi, inseriti a conclusione del numero di schede riportate a scopo esemplificativo, restituiscono le percentuali di distribuzione dei casi rispetto ai tipi ricorrenti di *pattern* utilizzati, alla curvatura dei pannelli ed al loro comportamento strutturale, distinguendo tra sistemi di pannelli portati, nel caso in cui sia presente una struttura o una sottostruttura di sostegno, e autoportanti. Inoltre, è stato inserito un elenco completo di tutte le opere che compongono il campione indagato. La schedatura è stata fondamentale per individuare i contenuti da approfondire. Dall’os-



4.10 - ICD/ITKE Research Pavilion ICD, A. Menges, J. Knippers, 2010.
4.11 - Shellstar pavilion, 2012. Particolare del nodo, (translucent Coroplast, nylon)
4.12 - Blime-Light (materiale: laser cut paper)
4.13 - I sistemi di assemblaggio degli elementi convergono in delle originali soluzioni “artigianali”, generate dalla creatività dei *designer* e dei *makers*.

servazione del campione risulta, infatti, che i pannelli prodotti per la razionalizzazione di superfici complesse sono prevalentemente piani. Inoltre, i *pattern* geometrici maggiormente utilizzati sono quello triangolare, quadrangolare e, in piccolissima percentuale, esagonale: l'uso prevalente dei *pattern* corrispondenti alle tre tassellazioni regolari per la razionalizzazione di opere di media e grande scala conferma le riflessioni fatte all'interno del precedente paragrafo.

Il *pattern* esagonale, nonostante i numerosi vantaggi di natura costruttiva e geometrica (cfr.cap.VI), è ancora molto poco sfruttato. Inoltre, la maggior parte dei sistemi è composta dall'assemblaggio di pannelli in vetro: pertanto, necessita di un'apposita sottostruttura di sostegno.



Si è più volte sottolineato che uno degli aspetti che influenza notevolmente il problema del *paneling* delle superfici complesse risiede nelle modalità attraverso cui la superficie è generata.

I grafici esplicativi contenuti nelle schede (scheda C1) mostrano che parte delle forme complesse indagate nascono dall'applicazione di leggi di moto, semplici o composte, nelle quali le curve coinvolte sono classificate come geometrie *free form*: dunque, anche la superficie che ne deriva è di tipo complesso. Pertanto, all'interno del quinto capitolo è stata affrontata una ricognizione dei principi geometrici necessari per sistematizzare i problemi legati alla pannellizzazione delle superfici complesse, allo scopo di approfondire le conoscenze teoriche necessarie per la ricerca di nuove soluzioni.

Dalle riflessioni fatte, le tassellazioni regolari rappresentano dunque la soluzione più conveniente per approcciare in maniera semplice ed ottimizzata alla scomposizione della complessità.


Il sesto capitolo indaga l'intimo rapporto tra la natura delle superfici complesse e la distribuzione di tali *pattern*, al fine di rivelare le potenzialità ed i limiti manifestati dalle forme in fase di discretizzazione.

LEGENDA




ON
OFF


Geometria dei pannelli




Pattern triangolare




Pattern esagonale




Pattern quadrangolare



Pattern irregolare




Pannelli piani




Pannelli curvi

Comportamento strutturale




Sistema autoportante




Sistema portato

Fabbricazione e costruzione




Materiale naturale




Materiale artificiale

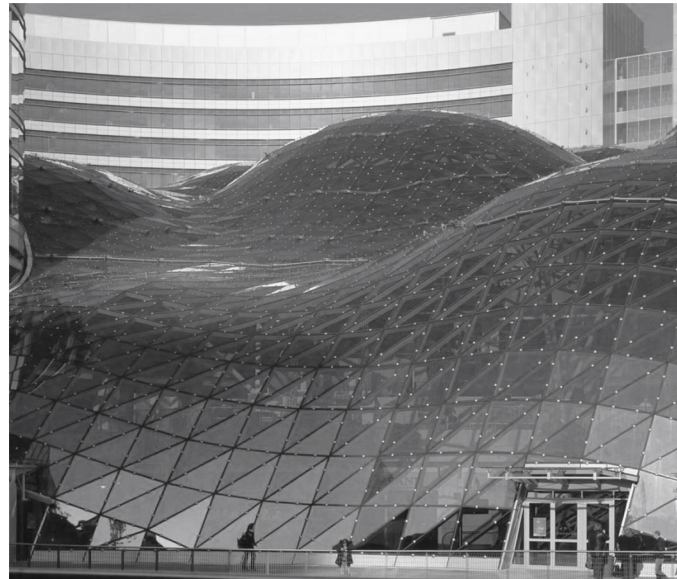
Sostenibilità



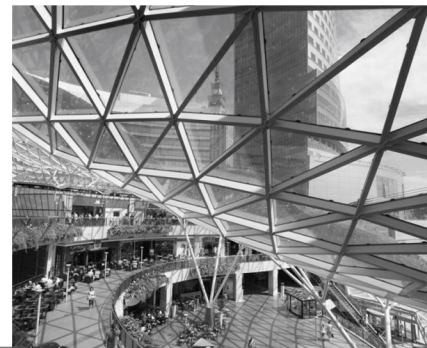
Riciclabile



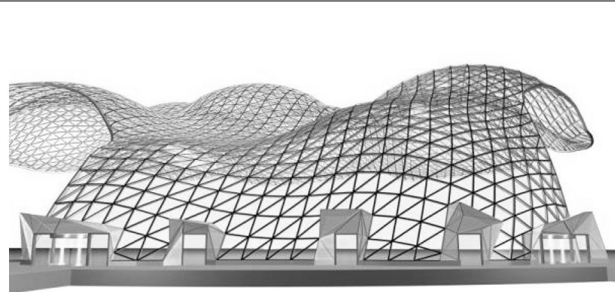
Scala Architettonica



Design:
The Jerde Partnership International
Data:
2007
Luogo:
Varsavia, Polonia
Funzione:
Centro multifunzionale
Pannelli:
pannelli in vetro



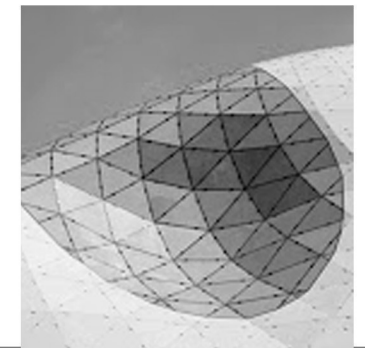
pattern e comportamento statico



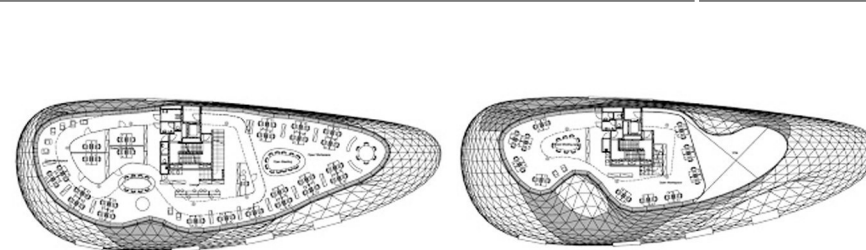
grafici e fase di cantiere



Design:
Massimiliano Fuksas
Data:
2010
Luogo:
Eindhoven, Netherland
Funzione:
Centro multifunzionale
Pannelli:
pannelli in vetro e metallo



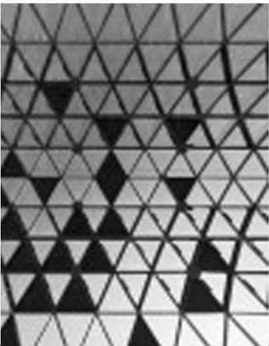
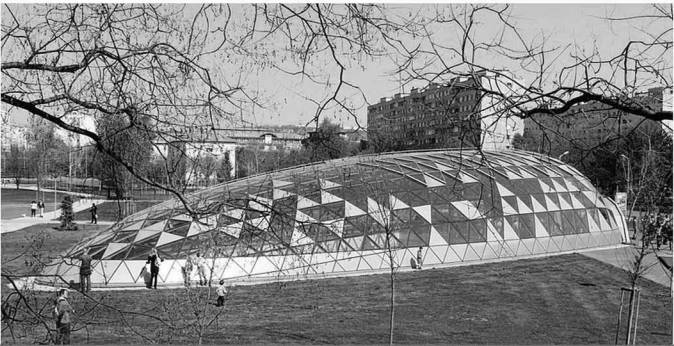
pattern e comportamento statico



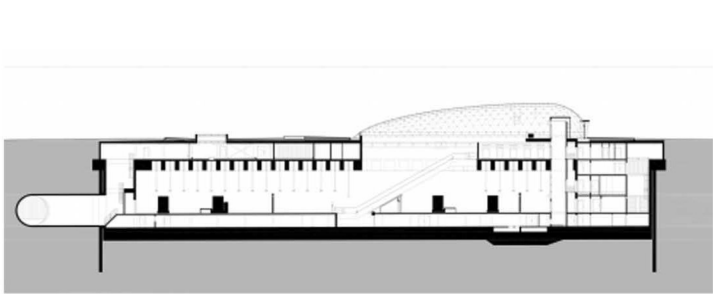
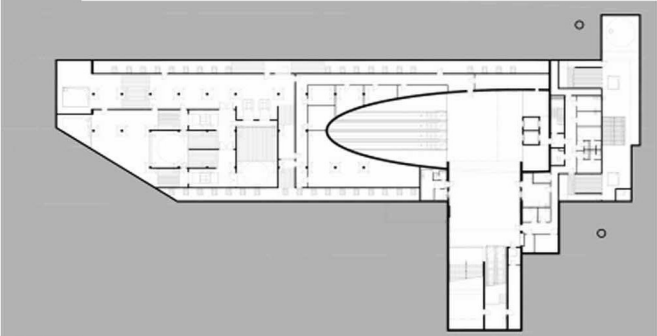
grafici e fase di cantiere



Design:
Z.Erő, B.Csapó, D. Brückner, Z. Kosztolányi
Data:
2014
Luogo:
Budapest, Ungheria
Funzione:
Budapest Underground Station - Line M4
Pannelli:
pannelli in vetro e metallo



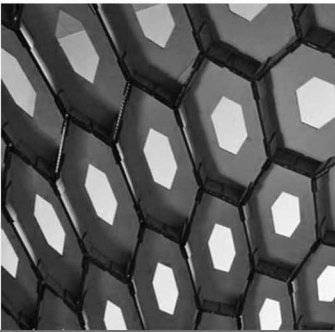
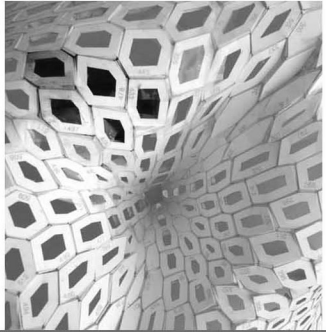
pattern e comportamento statico



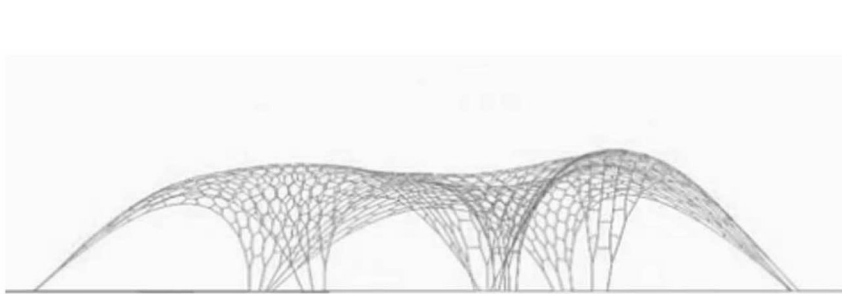
grafici



Design:
School of Architecture, University of Minnesota
Data:
2012
Luogo:
Minneapolis, Minnesota, USA
Funzione:
Padiglione
Pannelli:
pannelli in cartone ondulato



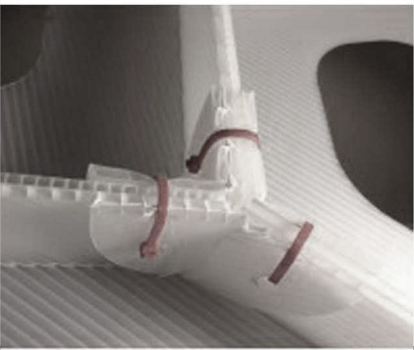
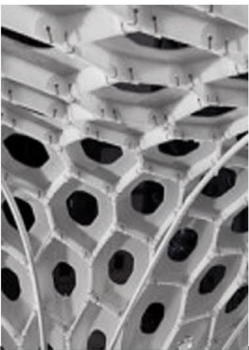
pattern e comportamento statico



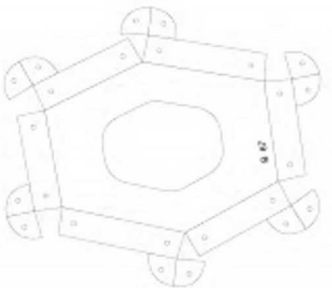
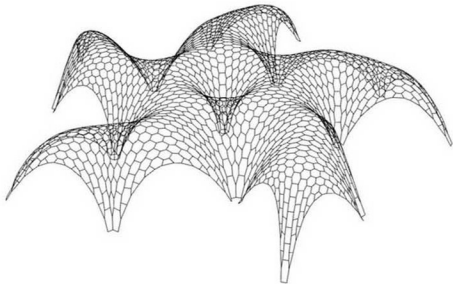
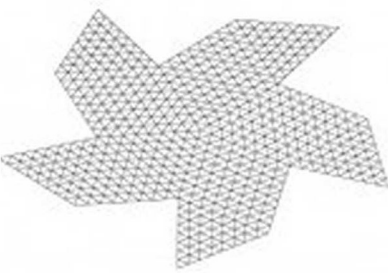
grafici



Design:
Andrew Kudless/Matsys, Art Lab
Data:
2012
Luogo:
Wan Chai, Hong Kong
Funzione:
Padiglione
Pannelli:
pannelli in Translucent Coroplast



pattern e comportamento statico



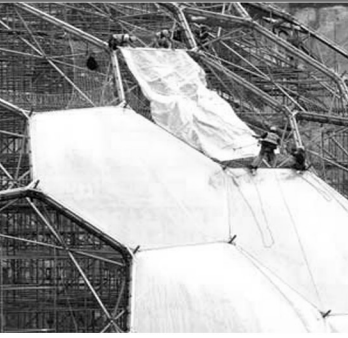
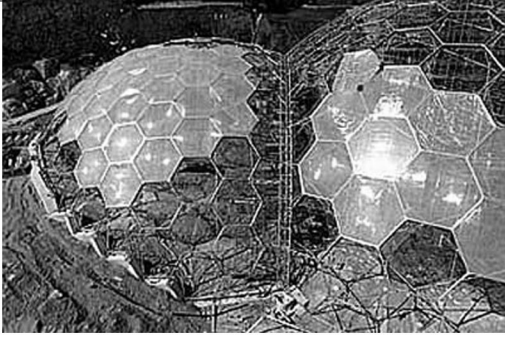
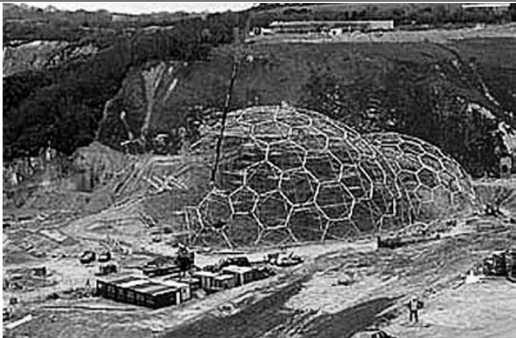
grafici



Design:
Nicholas Grimshaw
Data:
2000
Luogo:
St Blazey, Cornwall, UK
Funzione:
Serra
Pannelli:
pannelli in ETFE



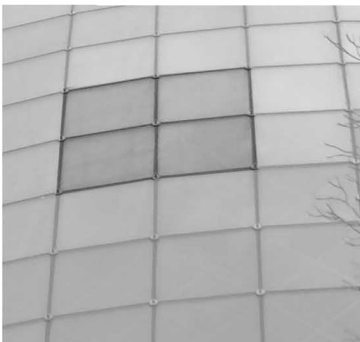
pattern e comportamento statico



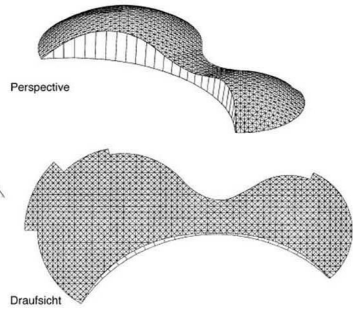
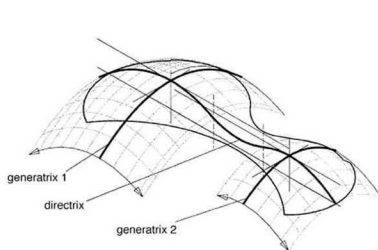
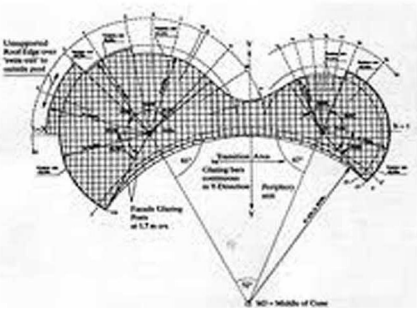
fasi di cantiere



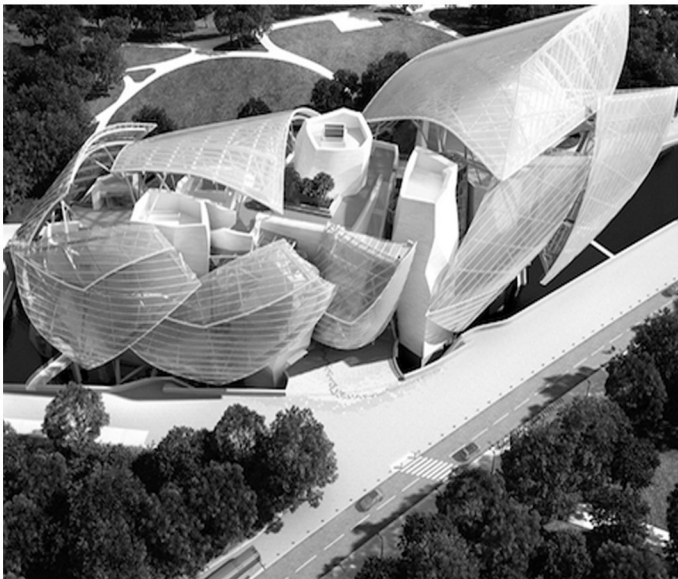
Design:
J. Gribl, Schlaich, Bergerman + Partner
Data:
1996
Luogo:
Berlino, Germania
Funzione:
House for Hyppopotamus
Pannelli:
pannelli in vetro



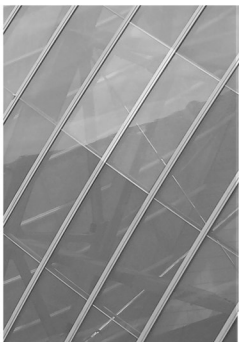
pattern e comportamento statico



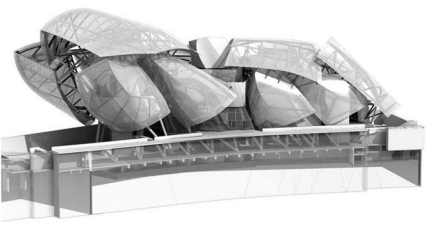
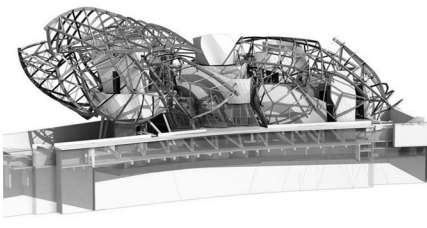
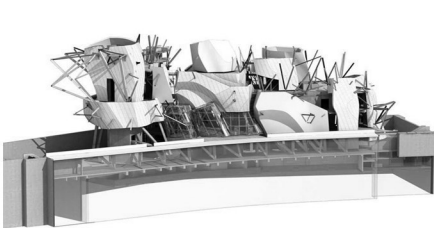
grafici



Design:
Gehry Partners, LLP (RFR Group, Paris)
Data:
2014
Luogo:
Parigi, Francia
Funzione:
Museo di arte contemporanea
Pannelli:
pannelli in vetro



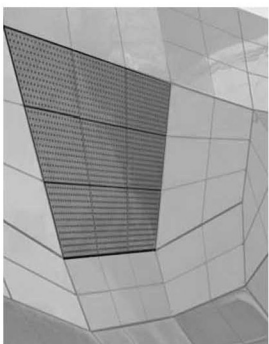
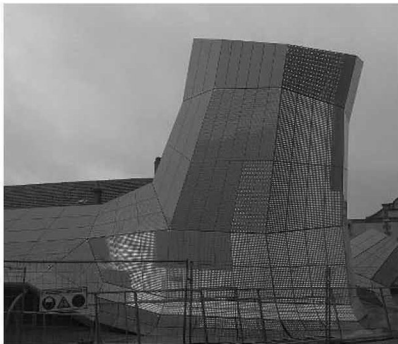
pattern e comportamento statico



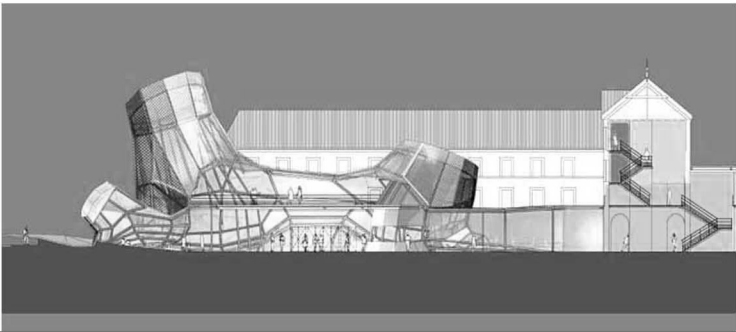
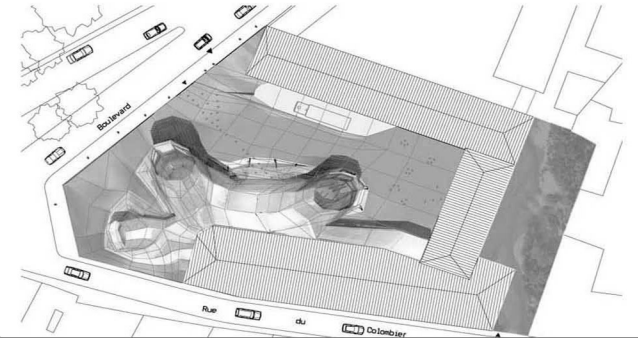
grafici



Design:
Jakob + MacFarlane
Data:
2013
Luogo:
Frac center - Orléans, Francia
Funzione:
Centro multifunzionale
Pannelli:
pannelli in alluminio pieno e forato - legno



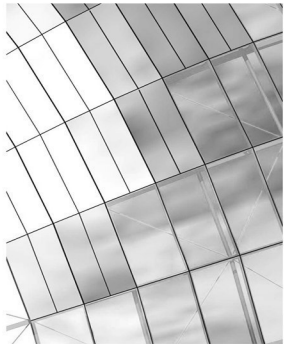
pattern e comportamento statico



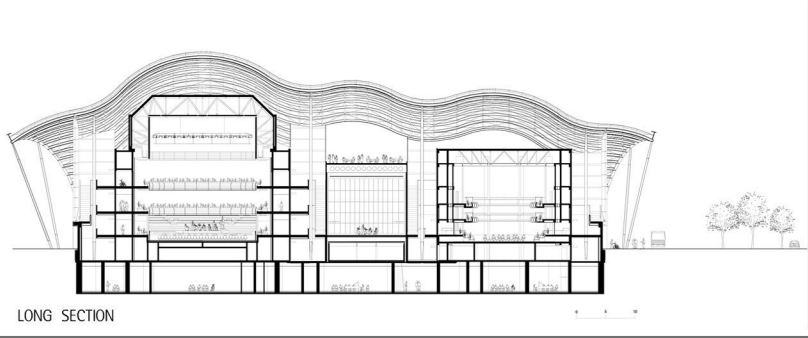
grafici



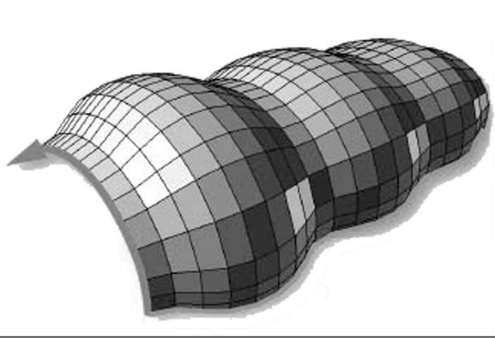
Design:
Foster + Partners (Arup Acoustics, M.MacDonald)
Data:
1997 > 2004
Luogo:
Gateshead, UK
Funzione:
Centro - sala concerti e congressi
Pannelli:
pannelli in vetro



pattern e comportamento statico



LONG SECTION



grafici

Il campione di riferimento: elenco dei casi

A - Pattern Triangolare

- 1)*2b Glass Pavilion*, Roland Wahlroos-Ritter, USC School of Architecture, California (USA), 2013, (policarbonato)
- 2)*Art and Science Pavilions*, LAB Architecture Studio, Chris Yiu-hang Chan & Stephanie Mee-lee Tan,Wujin (China)
- 3)*Bikás Park Station*, Palatium Studio, Budapest, Tétényi Way (Hungary), 2014, (vetro)
- 4)*BMW Welt*, Coop Himmelb(l)au for BMW Group, Munich (Germany), 2003-2007, (vetro)
- 5)*Bubbleecture H*, Shuhei Endo, Sayo-cho, Hyogo(Japan), 2005-2008, (acciaio)
- 6)*Capital Gate*, RMJM Dubai, Abu Dhabi (United Arab Emirates),2007-2011, (vetro)
- 7)*Cityscope*, Marco Hemmerling, Cologne(Germany),2008, (vetro)
- 8)Georges-Freche School of Hotel Management,Massimiliano and Doriana Fuksas,Montpellier(France),2007-2012, (alluminio)
- 9)*Dalian International Conference Center*,Wolf Prix, Coop Himmelb(l)au, Dalian(China),2013, (vetro)
- 10)*DZ Bank*, Frank O. Gehry & Associates Inc., Berlin(Germany),2000, (vetro)
- 11)*Events Center Feria Valencia*,Tomás Llavador, Valencia(Spain), 2007, (vetro)
- 12)*Nuova Fiera di Milano*, Massimiliano Fuksas, Rho,Milano(Lombardia), 2005 (vetro)
- 13)*Great Court of the British museum*, Norman Foster, London(UK), 2004-2006, (vetro)
- 14)*Helios House*, Office dA and Johnston Marklee Architects, Los Angeles(USA), 2007, (acciaio inox riciclato)
- 15)*Israel Pavillion for Shanghai World Expo 2010*, Haim Dotan architects, Shangai (China), 2000, (vetro)
- 16)*KK100*, Terry Farrell and Partners, Shenzhen(Cina), 2007-2011, (vetro)
- 17)*La lanterna di Fuksas*, Studio Fuksas - Massimiliano e Doriana Fuksas, Roma (Italia), 2012-2013, (vetro)

- 18)*L'Onda Carioca*, Nir Sivan Architects Associates, Rio de Janeiro (Brasile), 2014, (vetro)
- 19)*Mode Gakuen Spiral Towers*, Nikken Sekkei Ltd., Nagoya,Chubu (Giappone), 2005-2008, (vetro)
- 20)*Dipartimento delle arti islamiche del Louvre*, Mario Bellini e Rudy Ricciotti, Parigi (Francia), 2005-2012, (alluminio)
- 21)*Museum of the Moving Image*, Leeser Architecture, New York(USA), 2008-2011, (alluminio)
- 22)*MyZeil Shopping Mall*, Studio Fuksas-Massimiliano and Doriana Fuksas, Frankfurt (Germany), 2002-2009, (vetro)
- 23)*Guangzhou Opera House*, Zaha Hadid, Guangzhou (China), 2005-2010, (vetro)
- 24)*Il padiglione degli Emirati Arabi*, Norman Foster + Partners, Shanghai (China), 2010, (acciaio)
- 25)*Canary Wharf Crossrail*, Foster + Partners, London(UK)2008 (ETFE)
- 26)*Salvador Dali Museum*, HOK, St. Petersburg, Florida(USA), 2011, (vetro)
- 27)*Scandic Victoria Tower*, Gert Wingårdh, Stockholm(Sweden), 2011, (vetro)
- 28)*Swiss Re Tower*,Foster and Partners, London(UK), 2001-2003, (vetro)
- 29)*De Blob*, Studio Fuksas - Massimiliano and Doriana Fuksas, Eindhoven(Olanda), 2003-2010, (vetro)
- 30)*Zlote Tarasy*, The Jerde Partnership International, Warsaw(Poland), 2007, (vetro)
- 31)*Full of Triangles*, Junichiro Ikeura, Fukuoka(Japan), 2014, (metallo)

B - Pattern Esagonale

- 1)*Eden Project*, Nicholas Grimshaw, St Blazey, Cornwall(UK), 2000, (ETFE termoplastico)
- 2)*EXOtique*, Projectione, Muncie, Indiana (USA), 2011, (Acrilico - polistirolo)
- 3)*Hexigloo Pavilion*, Tutors: T. Cosmatu, I. Bogdan, A. Raducanu, Guest Tutors: A.Gheorghe, A.r Kalachev, B. Pap, Bucharest(Romania),2011

- 4)*Catalyst Hexshell*, Marc Swackhamer,
University of Minnesota School of Architecture,
Minneapolis(Minnesota), 2012, (Corrugated Cardboard)
- 5)*Landesgartenschau Exhibition Hall*, ICD/ITKE/IIGS,
University of Stuttgart, University of Stuttgart,
Stuttgart (Germany), 2014, (Wood)
- 6)*Shell Star Pavillion*, Andrew Kudless and Riyad Joucka,
Wan Chai(Hong Kong), 2012, (Translucent Coroplast, Nylon Cable, PVC
and Steel Reinforcement Arches)
- 7)*Museo Soumaya*, FR-EE / Fernando Romero Enterprise,
Mexico City (Mexico), 2011, (acciaio)
- 8)*Cocoon Temporary Pavilion*, Meedarch – Co-de-iT,
Cava de’Tirreni (Italia), 2013, (cartone ondulato)
- 9)*Cocoon Evo Pavilion*, Meedarch – Co-de-iT,
Cava de’Tirreni (Italy), 2013 (cartone ondulato)
- 10)*Research Pavilion 2011*, ICD (A. Menges) & ITKE (J. Knippers),
Stuttgart University, Stuttgart (Germany), 2011, (plywood)
- 11) *Sutd Library Pavilion*, City Form Lab,
Singapore University of Technology and Design,
Dover Rd, Singapore, (2013)

C - Pattern Quadrangolare

- 1) *The Bridge Pavilion*, Zaha Hadid,
Zaragoza(Spain), 2005-2008 (*fiberlass*)
- 2) *Arena Corinthians*, Diegues Coutinho, Lamb Architects,
Sao Paulo(Brazil), 2011-2014, (vetro)
- 3) *Pathé Foundation*, Renzo Piano Building Workshop,
Paris (France), 2006-2014, (vetro)
- 4) *Beekman Tower*, Frank O. Gehry,
New York(Usa), 2006-2011,(acciaio inossidabile)
- 5) *Centro Ricerche e Auditorium Nardini*, Massimiliano Fuksas,
Bassano del Grappa (Vicenza - Italia), 2002-2004, (vetro)
- 6) *Botanical Gardens Heated Conservatory*, formTL and C. F. Møller Archi-
tekten, Aarhus (Danimarca), 1969, (ETFE)
- 7) *BMW Bubble - Solar Cloud*, Bernhard Franken), 1999 (glass)
- 8) *Chanel Mobile Art Pavilion*, Zaha Hadid,
2007(plastica)
- 9) *Copertura Abbazia di Neumunster*, RFR Ingénieurs,

- Lussemburgo, 2001-2003, (vetro)
- 10)*Eiffel Tower Pavilions*, Moatti-Rivière Architects,
Paris (France), 2012-2014(vetro)
- 11)*Elephant House*, Foster and Partners Architects,
Copenhagen Zoo (Denmark), 2002-2008, (vetro)
- 12)*National Centre for the Performing Arts*, Paul Andreu, Beijing(China),
2001-2007(titanio e vetro)
- 13)*Guggenheim Museum*, Frank Gehry,
Bilbao(Spagna), 1993-1997(titanio, cristallo)
- 14)*Courtyard Roof of the Museum of Hamburg History*, gmp-Architekten von
Gerkan, Marg und Partner,Hamburg, (Germany),1989, (vetro)
- 15)*Heydar Aliyev Cultural Centre*, Zaha Hadid Architects’,
Baku(Azerbaijan), 2007-2011, (fibra di vetro in plastica rinforzata-GFRP)
- 16)*Kunsthaus Graz*, Peter Cook e Colin Fournier,
Graz(Austria), 2000-2003 (plexiglas)
- 17)*Lentille du Métro Saint Lazare*, A.R.T.E. J.M Charpentier & Associés,
Paris (France), 2003(vetro)
- 18)*Hotel Marques de Riscal*, Frank O. Gehry,
Elciego(Spain), 2003-2006, (titanio)
- 19)*Liège-Guillemins railway station*, Santiago Calatrava,
Liège(Belgio),2009, (vetro)
- 20)*Louis Vuitton Foundation*, Frank Gehry,
Paris (France), 2006-2014 (glass)
- 21)*Musee de la dentelle et de la Mode*,
Henri Rivière et Alain Moatti, Calais(Francia), 2009, (vetro)
- 22)*Peek & Cloppenburg Department Store*, Renzo Piano,
Cologne (Germany),2005, (vetro)
- 23)*Berlin Main Station - Lehrter Bahnhof*, Meinhard von Gerkan and Jürgen
Hillmer gmp, Berlin(Germany), 1996-2006, (vetro)
- 24)*Pod Exhibition Pavilion*, Hijjas Kasturi Associates Sdn with Studio Ni-
coletti Associati, Kuala Lumpur (Malaysia), 2011, (alluminio)
- 25)*Ponte della Pace*, Michele De Lucchi,Tbilisi(Georgia), 2009-2010, (vetro)
- 26)*Smithsonian museum roof*, Foster + Partners,
Washington(USA), 2004-2007, (vetro)
- 27)*Swimming Bath Aquatoll Neckarsulm*, Kohlmeier und Bechler,
Heilbronn,Neckarsulm(Germany), 1989, (vetro)
- 28)*TGV train Station*, SNCF DAAB Agence des gares Paris,
Strasbourg (France), 2007, (vetro)
- 29)*Cloud Gate*, Anish Kapoor,

Chicago, Illinois(USA), 2004-2006, (acciaio inox)

30)*Dancing House*, Frank Gehry and Vlado Milunic,
Praga(Repubblica Ceca),1992-1996, (vetro)

31)*The Sage Gateshead*, Foster + Partners,
Gateshead Quays (UK), 2001-2004, (vetro)

32)*The Yas Hotel*, Asymptote - Hani Rashid + Lise Anne Couture,
Abu Dhabi(UAE), 2007-2009, (vetro)

33)*Walt Disney Concert Hall*, Frank Gehry,
Los Angeles, California (U.S.A),1999-2003, (acciaio)

34)*Hippo House*, J. Gribl, Berlin (Germany),1996, (vetro)

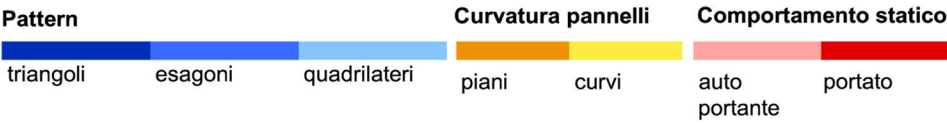
35)*The Turbulences FRAC Centre*, Jakob + Macfarlane Architects,
Orleans(France),2013, (metallo)

36)*Bosch Areal*, ARGE Prof. Ostertag + Vornholt,Heinle, Wischer und
Partner, Stuttgart (Germany),1997-2001, (vetro)

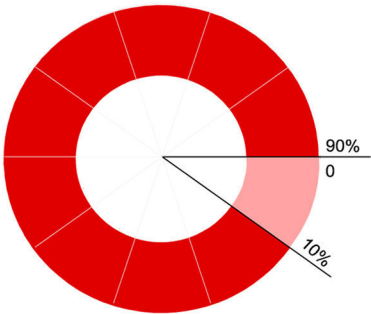
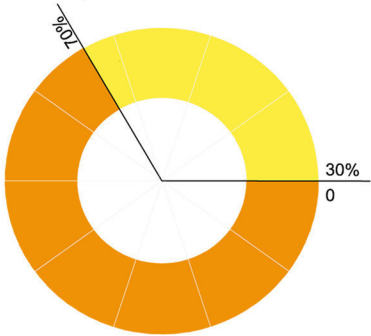
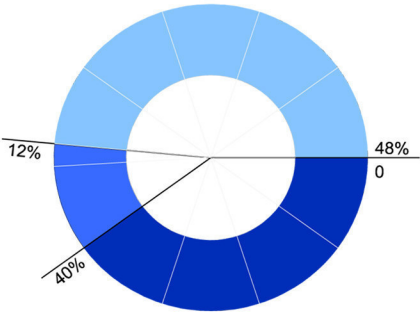
37)*Prada Tokyo Building*, Herzog & de Meuron,
Tokyo(Japan), 2000-2003, (vetro)

38) *Experience Music Project - EMP*, Frank O. Gehry,
Seattle, (U.S.A), (acciaio), 2004

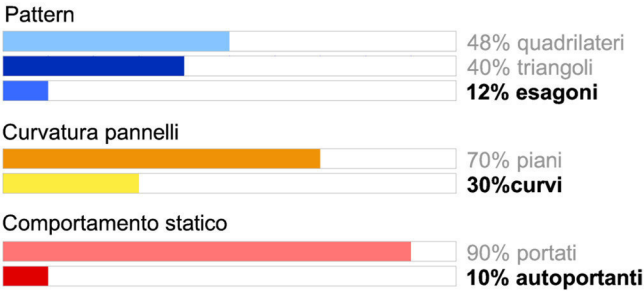
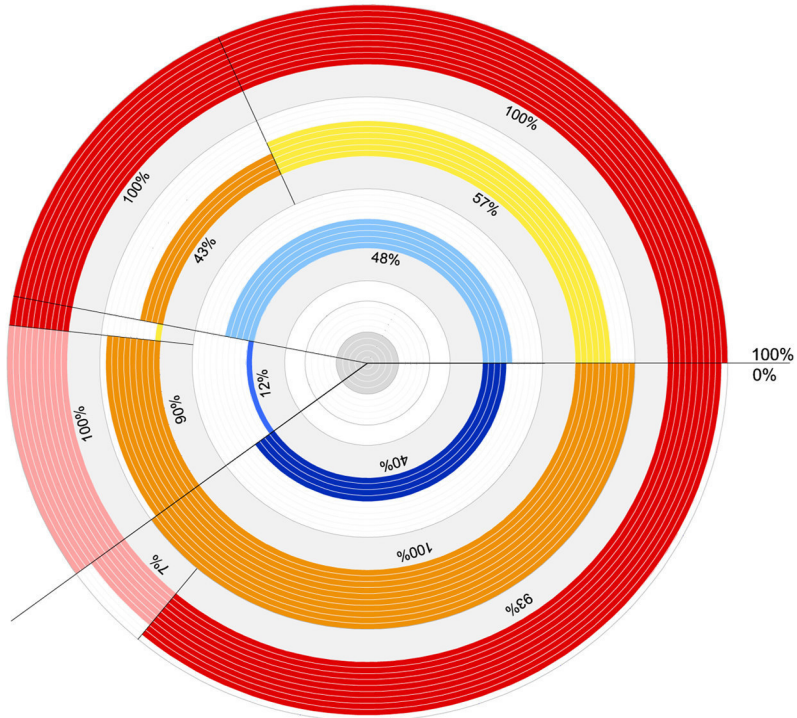
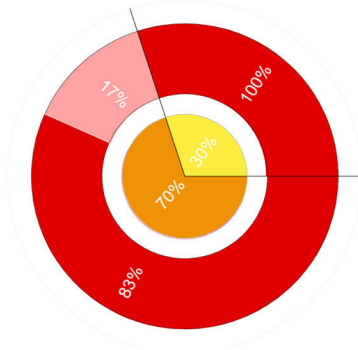
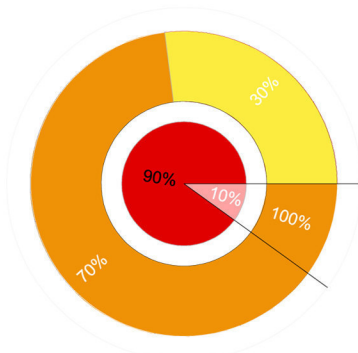
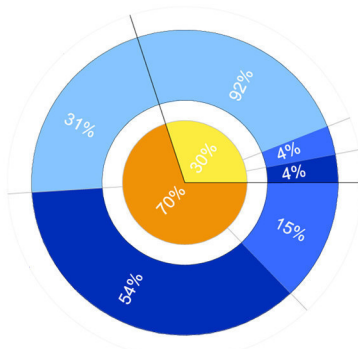
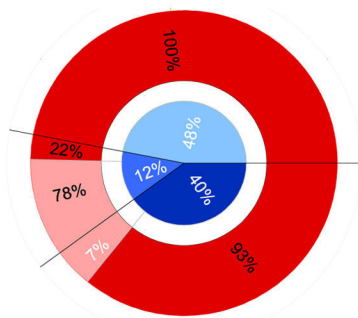
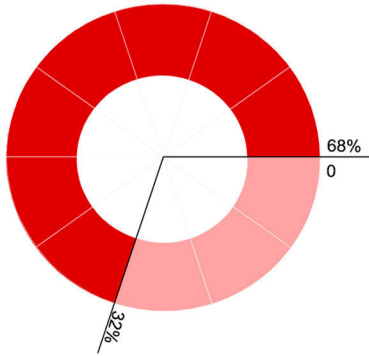
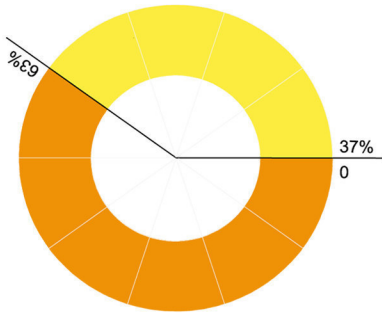
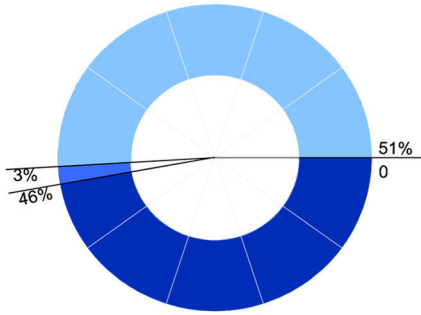
39) *Silver Mountain*, Kunihide Oshinomi - k/o design studio,
Senzoku Gakuen College of Music - Kawasaki, (Tokyo, Giappone), 2013



Sistema pannelli



Sistema sottostruttura



4.4 Sistemi portati vs sistemi autoportanti

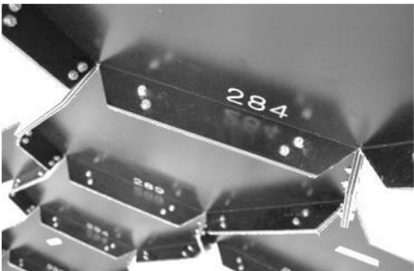
Nella media e grande scala architettonica, le dimensioni, la funzione, le prestazioni, le condizioni di vincolo e la natura delle superfici, influenzano, in maniera importante, la realizzazione di involucri e di facciate.

Da ciò deriva la necessità o meno di stabilire una “gerarchia” tra le parti che compongono il sistema, rendendo possibile la distinzione tra sistemi di pannelli staticamente dipendenti dall’esistenza di una sottostruttura di sostegno, quindi portati, e sistemi staticamente indipendenti, o autoportanti, in cui i singoli pannelli sono assemblati l’uno all’altro a comporre un sistema strutturalmente stabile ed indipendente. Data l’assenza di una struttura portante, tali sistemi rappresentano il sistema economicamente più vantaggioso, quindi il più interessante da indagare.

A tale proposito, ed in seguito ai risultati derivanti dalla schedatura del campione individuato, all’interno dell’ottavo capitolo è riportata un’esperienza applicativa derivante dalla ricerca di una forma idonea per la realizzazione di un sistema autoportante discretizzato mediante la distribuzione del *pattern* esagonale.

Le caratteristiche del materiale utilizzato per la fabbricazione dei pannelli giocano un ruolo fondamentale nella definizione di tale gerarchia. Infatti, come anticipato, è evidente che per i sistemi derivanti dall’assemblaggio di pannelli vetrati è necessario considerare l’esistenza di una sottostruttura metallica a cui fissare i singoli elementi (fig.4.14). Per alcuni materiali compositi, come *alucobond*, *etalbond*, (cfr. cap.VIII, par. 8.3.4) o altamente flessibili alla piegatura ed al taglio, come i cartoni, i polimeri (materie plastiche, gomme sintetiche e fibre tessili, ad esempio il nylon), l’alluminio o il legno, è possibile studiare diverse soluzioni di giunzione o incastro tra i pannelli, senza ricorrere necessariamente alla realizzazione di un’apposita struttura di sostegno.

(fig.4.15,16,17). Inoltre, la scelta del materiale è determinante per definire la natura geometrica e meccanica della tipologia di nodo da realizzare, a cui sono inevitabilmente legati specifici costi di produzione. Nel caso in cui, come per le strutture e sottostrutture metalliche, sia necessario realizzare degli appositi nodi di giunzione, certamente si verificherà che maggiore è il numero di elementi uguali, minori saranno i costi di produzione ed i tempi di montaggio.



4.14 - *La Nuova Fiera di Milano*. Particolare del nodo.
4.15 - *ICD/ITKE Research Pavilion ICD*. Particolare
4.16 - *Cocoon Evo Pavilion*, Medaarch/Co.de.iT, 2013.
Particolare del nodo (Etalbond)
4.17 - *Cocoon Temporary Pavilion*, Medaarch - Co.de.iT
(2013). Particolare del nodo (Cartone ondulato)

4.18 - *Hippo House*, J. Gribl, 1996.
(Pannelli portati - sottostruttura autoportante)
4.19 - *Catalyst Hexcell*, 2012. (Sistema autoportante)
4.20 - *La Fondation Louis Vuitton*, F. Gehry, 2014,
Parigi. (Pannelli portati - sottostruttura portata)



4.5 Sistemi discreti – semi discreti/misti – continui: *in medio stat virtus?*

Anche la curvatura degli elementi che discretizzano una superficie complessa rappresenta un dato fondamentale per la computazione di una soluzione economicamente ed esteticamente sostenibile.

La complessità delle forme architettoniche non rappresenta solo la libera espressione dell'immaginazione, ma è il riflesso dell'evoluzione delle capacità di calcolo, delle tecnologie e dei nuovi materiali necessari per ottenere risultati concreti.

Gli avanzamenti delle ricerche affrontate all'interno del settore dell'*Architectural Geometry* mirano a sviluppare un range di soluzioni capaci di integrare ed ottimizzare le fasi di progettazione, produzione e costruzione, favorendo la sostenibilità dell'intero approccio senza limitare l'espressività di designers e architetti.

Pertanto, è necessario indagare le forme nel rispetto dei vincoli geometrici e progettuali stabiliti.

Dall'osservazione del campione è possibile riscontrare che gli involucri e le facciate curve vengono realizzati soprattutto mediante l'assemblaggio di pannelli piani e che alcune superfici derivano dall'assemblaggio di porzioni di superfici a loro volta complesse, poco convenienti in quanto molto costose da produrre e maggiormente soggette a rottura.

Tuttavia, alcuni casi di recente esecuzione dimostrano che è possibile realizzare delle superfici complesse assemblando porzioni di superfici analitiche.

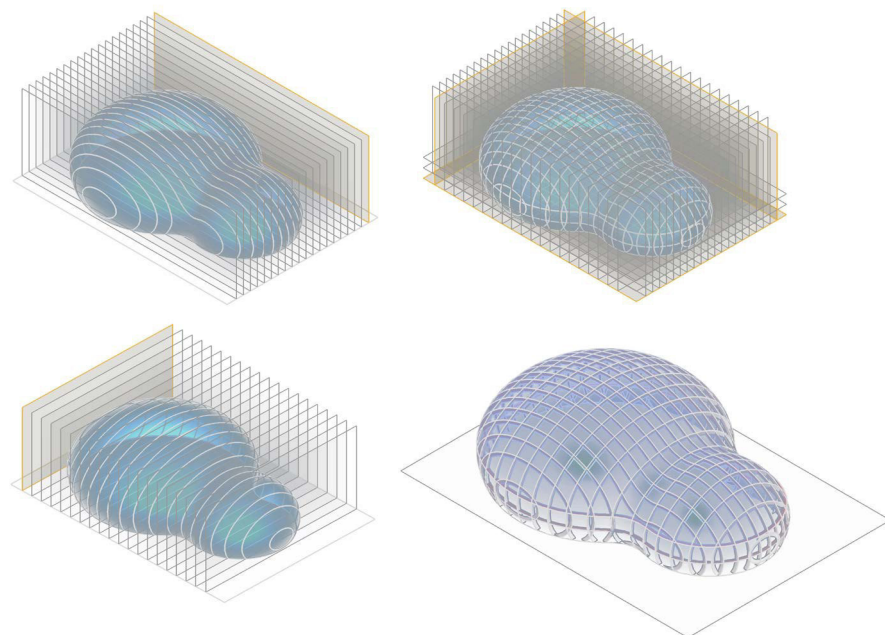
E' possibile classificare i sistemi per la progettazione e realizzazione di una superficie *free form* in sistemi *non rationalized*, sistemi *pre-rationalization* (la geometria della forma favorisce la razionalizzazione), e sistemi *post-rationalization*.¹⁶

Come anticipato, i sistemi non-rationalized, se consentito dal budget disponibile, dalla forma e dalle dimensioni dell'opera, dalle proprietà del materiale scelto e dalla tecnologia di fabbricazione disponibile, prevedono la realizzazione di una superficie *free form* senza ricorrere alla computazione di una soluzione di razionalizzazione, e quindi rinunciando all'ottimizzazione del risultato.¹⁷

Tra i processi che consentono tale tecnica è possibile citare la tecnica del *contouring* (fig.4.21). Tale tecnica consiste nel sezionare una superficie con un reticolo di piani mutuamente ortogonali:



4.21 - Le figure (in alto, a destra), mostrano il processo di contouring eseguito sul prototipo digitale del *Bubble BMW - Solar Cloud*, B. Franken, 1999, esempio di sistema *non - rationalized*.
4.22, 4.23, 4.24 - La facciata del *Fashion and Lace Museum di Calais*, Moatti e Rivière architectes, 2008.



la rete di curve individuata suddivide la forma in un sistema di *patch* a doppia curvatura, perfettamente adiacenti l'una all'altra, che conservano la continuità, e dunque la curvatura, del modello originale. Le curve/sezioni distribuite sulle superficie sono curve piane: per fabbricare gli elementi strutturali è necessario eseguire un *offset* di tali curve. Il *Bubble BMW - Solar Cloud* (1999) di Bernard Franken è un esempio di tale approccio (fig. 4.21).

I sistemi *pre-rationalization* limitano, invece, la progettazione delle forme a determinate classi di superfici, dotate di specifiche proprietà. Il *Fashion and Lace Museum di Calais* (2008), progettato da Moatti & Rivière Architects, è un esempio di sistema che si potrebbe definire “ibrido”: in questo caso, il *contouring* è stato eseguito su una superficie le cui curve di sezione derivano dalla variazione del diametro di tre cerchi distribuiti attaverso la lunghezza dell'edificio. Questo principio necessita della creazione di stampi differenti, tuttavia distribuiti su una superficie caratterizzata da due assi di simmetria (fig.).¹⁸ La *Biosfera* di Genova, progettata da Renzo Piano, superficie sferica nota anche come la *Bolla*, è chiaramente una superficie analitica a curvatura gaussiana costante, dunque geometricamente più semplice da gestire. Per l'elevata, talvolta apparente, complessità, sono sicuramente da citare i sistemi di modellazione di Frank O. Gehry: per generare le

sue forme l'architetto, talvolta, si avvale dell'utilizzo di fogli di carta o di diverso materiale. In diversi casi le superfici realizzate derivano dalla scansione di forme modellate a partire dalla semplice piegatura di fogli piani, pertanto, esse consistono in porzioni di superfici sviluppabili.¹⁹

Altre classi di superfici a cui questo secondo sistema di razionalizzazione si riferisce sono le superfici di traslazione e di rotazione, o generate dalla combinazione di entrambe le leggi di moto. E' possibile citare diverse soluzioni architettoniche le cui superfici, per la maggior parte rappresentate da sistemi di copertura o da facciate realizzate in vetro, sono state generate seguendo tale approccio, tra cui: la cupola di *Rostocker Hof*, a Rostock, le coperture della *West entrance* dell'*Hannover Fair*, la copertura di un cortile a pianta trapezoidale di a Lipsia, la superficie vetrata realizzata a copertura della piattaforma della nuova stazione ferroviaria di Lehrter, a Berlino, il complesso sistema di copertura di un cortile della *former Bosch Area* a Stoccarda. Le opere citate sono state realizzate in Germania da Schlaich Bergermann & Partners.²⁰ (fig.)

Un altro caso realizzato seguendo tale approccio è l'*Hippopotamus house* dello zoo di Berlino, progettato da J. Gribl (scheda 3a).

Queste superfici (cfr. cap V, par.5.3) consentono di razionalizzare le forme generate utilizzando pannelli quadrangolari piani.

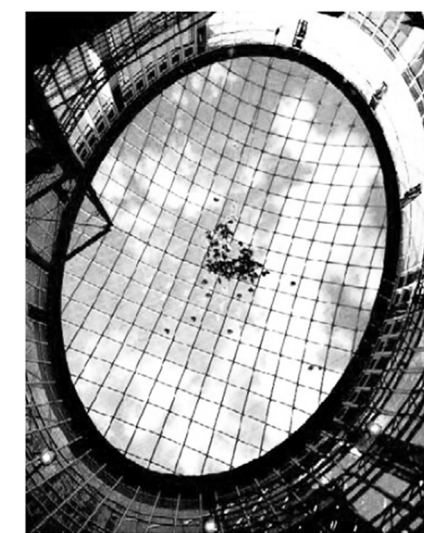
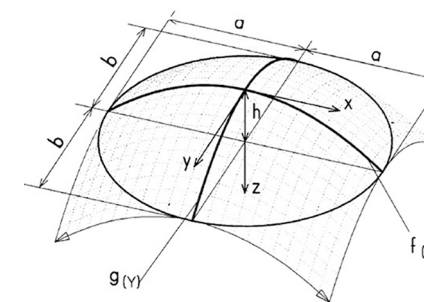
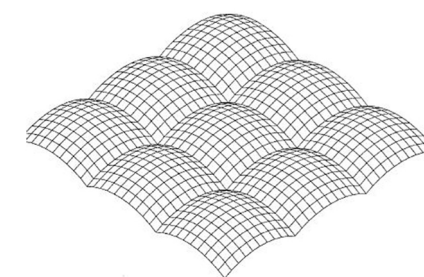
Infine, tra i sistemi di *post-razionalizzazione* è possibile distinguere i sistemi discreti ed i sistemi semi-discreti: entrambe le tipologie sono oggetto di molteplici ed interessanti ricerche sviluppate nell'arco degli ultimi dieci anni.

La triangolazione rappresenta la tecnica più semplice di post-razionalizzazione, in quanto non esistono limitazioni di natura geometrica all'individuazione di un piano passante per tre punti comunque distribuiti nello spazio, indipendentemente dalla curvatura della superficie da discretizzare ed alla quale i punti stessi appartengono.

Un inconveniente di tale sistema è legato alla complessità geometrica dei nodi e dalla non “offsetabilità”²¹ del sistema discreto ottenuto, la quale impedisce la realizzazione di sistemi multistrato.

Tuttavia, è comunque possibile ottimizzare i risultati derivanti da tale tecnica gestendo la regolarità distributiva, la dimensione, la forma, la ripetizione, l'allineamento e la qualità visiva della triangolazione ottenuta e dei singoli elementi che la compongono.

L'aspetto sfaccettato dei sistemi *post-razionalizzati* garantisce la mag-



4.25 - Sistemi di coperture della *West entrance, Hannover Fair*. Esempio di sistema *pre-rationalized*.
4.26 - La cupola di *Rostocker Hof*. Esempio di sistema *pre-rationalized*.

giore fattibilità economica dell'intero processo ma, talvolta, penalizza la resa estetica ed espressiva delle superfici.

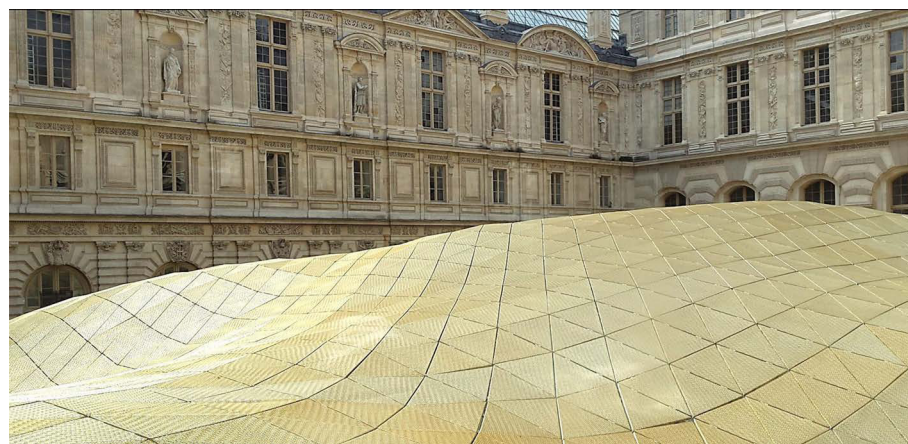
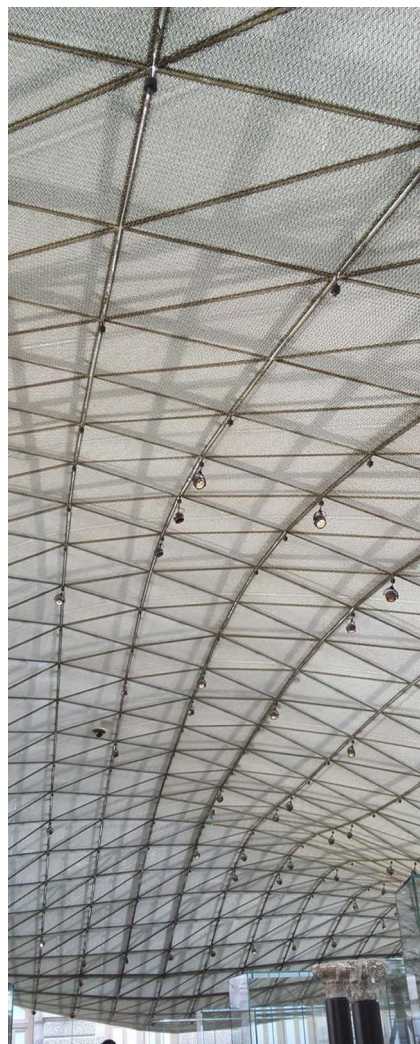
Come anticipato, uno degli avanzamenti più interessanti nel campo del *paneling* di superfici architettoniche di media e grande scala è rappresentato dalla possibilità di trasformare le superfici continue in geometrie non-sfaccettate in quanto derivanti dall'assemblaggio di porzioni di superfici a singola curvatura, realizzando dei “modelli semi-discreti”, cioè “una via di mezzo” tra i sistemi discreti, cioè composti da pannelli piani, ed i sistemi composti da pannelli a doppia curvatura.

Pertanto, in continuità con le riflessioni effettuate, è possibile porre la seguente domanda:

i pannelli a singola curvatura e i modelli semidiscreti rappresentano la soluzione in grado di garantire la sostenibilità costruttiva, economica ed estetica del processo rivolto alla realizzazione di superfici architettoniche di forma complessa?

I paragrafi seguenti sono stati sviluppati con l'intenzione di fornire una risposta a tale quesito, indagando le differenti tecniche di *Digital Fabrication* e contestualizzando le informazioni ricavate i risultati attraverso la descrizione di una serie di casi di *optimized post-rationalization*.

4.27, 4.28 - La copertura del Dipartimento delle Arti Islamiche - Museo del Louvre, M. Bellini, R. Ricciotti, 2012. Esempio di sistema discreto *post-rationalization*.



4.6 I materiali e le tecniche di fabbricazione

Per fornire delle risposte innovative al problema della razionalizzazione e fabbricazione delle superfici complesse è chiaramente necessario articolare le indagini su più fronti: non si può prescindere dalla conoscenza delle tecnologie e dei materiali che favoriscono l'ottimizzazione e l'industrializzazione del processo.

Pertanto, ogni singolo aspetto costruttivo coinvolto deve essere contestualizzato all'interno di un quadro di riferimento complessivo. La fase di fabbricazione coinvolge, infatti, tanto la produzione dei pannelli, piani o curvi, tanto quella degli elementi che compongono il sistema strutturale.

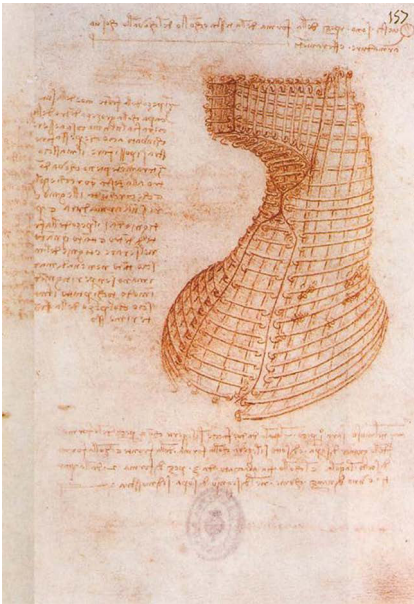
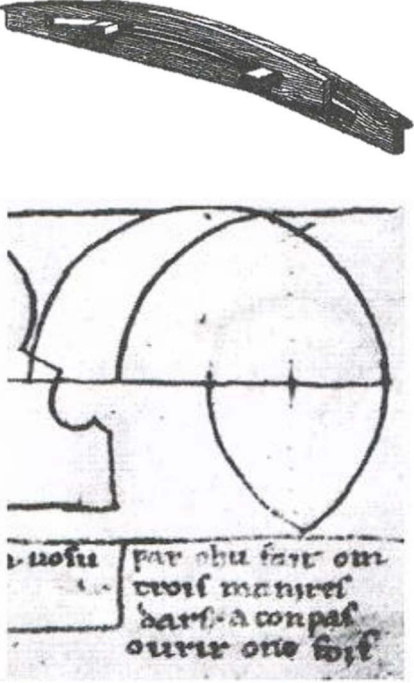
E' stato più volte sottolineato quanto oggi si assiste ad un rinnovato rapporto tra le potenzialità dell'industria, le costruzioni ed il progetto di architettura, oltre che alla stretta relazione tra ricerca della forma ed innovazione tecnologica, favorita dall'evoluzione degli strumenti informatici e dal trasferimento di materiali e di semilavorati da settori avanzati.

Le attuali tecniche di *Digital Fabrication* testimoniano il nuovo legame tra architettura, design industriale e fabbricazione ma, come anticipato, richiedono lo sviluppo di nuove competenze da parte dei progettisti. A supporto di tale esigenza, i prototipi, da sempre, rappresentano il luogo virtuale in cui definire le operazioni geometriche necessarie a garantire la massima semplificazione costruttiva e a semplificare le interazioni tra i vari elementi che compongono un oggetto.

*“Qualsiasi tentativo di costruzione teorica nel nostro ambito deve, fin dall'inizio, assumere un ruolo ausiliario, una condizione secondaria subordinata alle opere [...] E' come la centina che rende possibile la costruzione dell'arco: una volta compiuta la sua missione, scompare e non rientra nella percezione che abbiamo dell'opera finita, ma sappiamo che è stato un passaggio obbligato e imprescindibile, un elemento necessario a erigere quello che ora vediamo e ammiriamo.”*²¹

Nei secoli passati, come oggi, lo scopo della ricerca diviene, talvolta, quello di ribaltare l'oggetto dell'attività progettuale dall'opera agli “stampi” necessari per realizzarne le singole parti.

La progettazione e produzione della cassaforma/stampo è da sempre una delle fasi più importanti per la realizzazione di un manufatto. Il cassero rappresenta, infatti, l'impronta in negativo necessaria ad imprimere nella materia una forma così come ideata in fase proget-



4.29 - La centina telescopica.
4.30 - Villard de Honnecourt, la regola dei tre archi.
4.31 - Leonardo da Vinci, Disegno di progetto per lo Stampo della testa del cavallo del monumento equestre dedicato a Francesco Sforza

tuale. La “centina”, ad opera ultimata non più presente o visibile, rappresenta un’impronta talvolta riconoscibile nella distribuzione degli elementi fabbricati.

Tra i numerosi esempi di ottimizzazione geometrica, la regola dei tre archi di Villard De Honnecourt ha consentito di ricavare tre tipi di archi diversi aprendo il compasso una sola volta: dall’impostazione di un unico raggio costate deriva la curvatura della centina telescopica, ma soprattutto l’organizzazione del cantiere e del montaggio di elementi tutti uguali tra loro e derivanti da un’unica originaria impronta geometrica ricorrente.

Nel passaggio dalla tradizione all’innovazione, agendo sulle superfici mediante specifiche operazioni geometriche è possibile ricavare le tracce/profilo attraverso cui viene discretizzata la forma iniziale.

Le superfici vengono realizzate fisicamente ricucendo materialmente le singole porzioni o *patche* geometricamente definite mediante il paneling del prototipo digitale. Tale operazione consente l’estrazione delle tracce degli elementi da fabbricare e da assemblare: lo scopo è quello di distribuire elementi ripetibili, la cui fabbricazione è dunque più economica.

Le tecniche impiegate per la produzione degli elementi operano per sottrazione, per addizione o tramite deformazione del materiale.

La superficie, per essere realizzata, necessita di essere discretizzata, cioè “razionalizzata”: tale operazione è tanto più necessaria quanto è più complessa la forma dell’oggetto da realizzare.

La fattibilità di una forma architettonica è fisicamente legata ai materiali utilizzati, i quali, a loro volta, dipendono strettamente dalla scala e dalla funzione a cui la struttura è destinata. Pertanto, è doveroso calare le riflessioni sviluppate nei capitoli precedenti nel campo concreto delle tecnologie e dei materiali, oggetto di nuovi, continui approcci di ricerca e sviluppo.

Tra i materiali sperimentati per la realizzazione di forme complesse troviamo il vetro, la vetroresina, i metalli, le schiume di titanio, le resine, i conglomerati, l’Etf, il legno, il cartone, i polimeri, la gomma, la plastica, le membrane in PVC, diversi materiali riciclati ed i materiali compositi²² (tra cui etalbond, alucobond, etc. Cfr. cap VIII). Mediante l’uso di tali materiali è possibile fabbricare pannelli piani e curvi. Altro riferimento materico interessante è rappresentato dall’uso innovativo del mattone, come nel caso del museo *MARTa* di Herford (fig.), progettato da Frank O. Gehry, oppure dalla realizzazione

di involucri matericamente compositi, come l’involucro realizzato in cemento e dischi di alluminio del *Selfridges Building* di Birmingham, progettato da Future Systems.²³

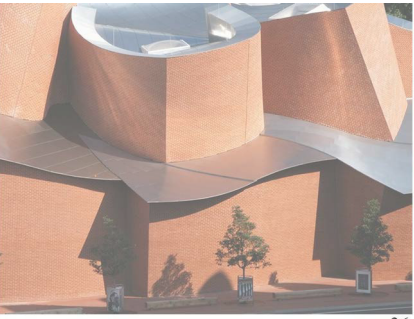
Altro esempio di sistema matericamente composito è il *Centre Culturel et Touristique du Vin* di Bordeaux, progettato da X-TU Architects, presenta una facciata di 9.000 mq realizzata assemblando pannelli di metallo e di vetro piani e a singola curvatura.

L’indagine delle tecniche di *Digital Fabrication* impiegate per la fabbricazione di pannelli curvi dimostra che la produzione di elementi a singola curvatura rappresenta la soluzione sicuramente più conveniente da ogni punto di vista. Ad esempio, le superfici complesse della *Walt Disney Concert Hall*, sono composte da pannelli metallici piani e a singola curvatura, la cui forma è stata raggiunta attraverso un processo di conversione delle porzioni di superfici a doppia curvatura in superfici sviluppabili, mentre nell’*Experience Music (EMP)* di Seattle, le lastre metalliche che compongono la superficie sono state piegate a freddo ed in loco. I pannelli a doppia curvatura dello *Chanel Mobile Art exhibition building*, padiglione progettato da Zaha Adid, sono stati fabbricati utilizzando un materiale plastico rinforzato (FRP), più economico e facile da manipolare rispetto ai pannelli di lamiera: la scelta di tale materiale è stata incoraggiata dal carattere temporaneo della struttura, richiamata a delle prestazioni sicuramente più limitate rispetto a quelle avanzate per una struttura permanente.²⁴

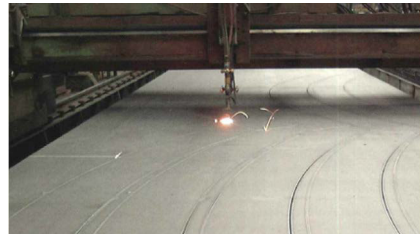
L’utilizzo di tecnologie *CNC (Computer Numeric Control)*, consente di produrre direttamente dal modello digitale il prototipo o il componente edilizio, by-passando la produzione di disegni esecutivi, e proponendo un approccio *file-to-factory*. Secondo tale approccio, in fase di assemblaggio i disegni esecutivi possono essere omessi: i dati necessari per il montaggio del sistema sono riportati direttamente sugli elementi che lo compongono oppure vengono comunicati a robot e bracci meccanici appositamente programmati per manovrare ed assemblare i pezzi. Nell’ambito dei processi rivolti all’ottimizzazione dei processi *file-to-factory*, è importante considerare il *nesting*.

La funzione *nesting*, termine inglese il cui significato letterale è “anidamento”, o “nidificazione”, consente di ottimizzare il taglio degli elementi da assemblare.²⁵ Tale processo, derivante dall’industria tessile e dell’acciaio, è adottato in diversi settori, tra cui la scultura, il design, la moda, il settore navale, etc.

In particolare, questa trattazione focalizza l’attenzione sul tema del



4.32 - Il MARTa Museum, F. O. Gehry, 2005
4.33 - Walt Disney Concert Hall, F. O. Gehry, 2003
4.34 - Il Selfridges Building, Future System, 2003
4.35 - Chanel Mobile Art exhib. building, Z. Adid, 2007



4.36 - Tecniche CNC: *Bi-dimensional cutting*
4.37 - Esempio di *nesting*. I pannelli sono distribuiti in maniera ottimizzata sul supporto di materiale da sottoporre al taglio
4.38 - Robot milling for free form surface, T U Vienna

nesting bidimensionale. Avvalendosi di appositi algoritmi, tale procedura consiste nell'ottimizzare la distribuzione dei singoli elementi da fabbricare sul formato del pannello di materiale da sottoporre a taglio. Eseguito il *nesting* dei pezzi, per procedere al taglio, dunque alla fabbricazione, è necessario convertire la geometria e la posizione degli elementi, virtualmente distribuiti sul supporto di materiale, in linguaggio macchina.²⁶ Tra i *software* di *nesting* disponibili e *user friendly* è possibile citare *RhinoNest®* di *Rhinoceros*.²⁷

Le tecniche di *Digital Fabrication* possono essere classificate in base al tipo di processo, di macchine e di materiali impiegati: è possibile distinguere i processi *Bi-Dimensional Cutting*, le tecniche sottrattive e le tecniche additive.²⁸

I processi *Bi-Dimensional Cutting* sono basati sul taglio di fogli bidimensionali di diverso materiale, tra cui alluminio, acciaio, legno, compensato o acrilico e consentono di produrre automaticamente pannelli piani anche di diversa forma. Il computer controlla il movimento delle macchine, che si dividono tra fresatrici, torni e macchine per il taglio laser o a getto d'acqua, dette anche *water jet*.

Le tecniche sottrattive generano gli oggetti rimuovendo materiale da un blocco di partenza. Le macchine impiegate per queste tecniche producono gli stessi risultati raggiungibili con le tecniche *Bi-Dimensional Cutting*, con l'ulteriore vantaggio di specificare la profondità del taglio (fig.4.38). I blocchi scolpiti per ricavare la geometria modellata possono essere di diverso materiale. Tuttavia, utilizzando una fresatrice a tre assi non è possibile riprodurre qualsiasi geometria: dunque, per fabbricare oggetti di maggiore complessità è necessario il ricorso ad una fresatrice a cinque o a sei assi.²⁹

Tra le tecniche additive, la Prototipazione rapida, *Rapid Prototyping* (RP), rappresenta un processo attraverso cui il materiale viene depositato in strati successivi fino a ricomporre l'oggetto tridimensionale.³⁰ Tale tecnica ritorna utile per la produzione di stampi necessari a per la fabbricazione di elementi curvi, in particolare per la realizzazione di pezzi a doppia curvatura.

A differenza dalle tecniche tradizionali di lavorazioni meccaniche per sottrazione, le tecniche RP operano per addizione di materiale, con la possibilità di ottenere forme anche molto complesse, impossibili da realizzare con le lavorazioni tradizionali, semplicemente aggiungendo materiale strato per strato, dunque mediante un processo di *layered manufacturing* (fabbricazione stratificata). Gli strati sovrapposti

di materiale rappresentano le sezioni successive ricavate eseguendo lo *slicing* del modello digitale.

Lo *slicing* è la suddivisione del modello matematico in fette, o in gradienti, orientate orizzontalmente rispetto alla disposizione dell'oggetto all'interno del volume di stampa della macchina (fig.4.39)

A differenti spessori delle *slices* corrispondono differenti risultati, ma più sottili sono i *layers*, maggiori saranno i tempi di produzione.

In seguito, lo *slicing* viene convertito in un formato leggibile dalla macchina per la stampa 3D dell'oggetto. Il formato di stampa 3D più comunemente usato è lo *Standard Triangulation Language* (STL).

Il formato *STL* triangola il modello digitale e comunica le coordinate dei vertici di ciascuno degli elementi ordinandoli secondo la regola della mano destra; maggiore è il numero dei tasselli triangolari, più continua e liscia appare la superficie del modello prototipato.

Il formato dei files di output può essere di tipo ASCII o *Binary*.

La prototipazione procede con la deposizione del materiale strato per strato fino a realizzare l'oggetto finale. Infine, è necessario togliere l'oggetto stampato dalla macchina e liberarlo dal supporto o dal materiale in eccesso ed eventualmente operare ulteriori finiture.

La classificazione delle tecniche RP può quindi essere basata sulla natura dei materiali impiegati, in particolare polveri, liquidi e solidi.³⁰

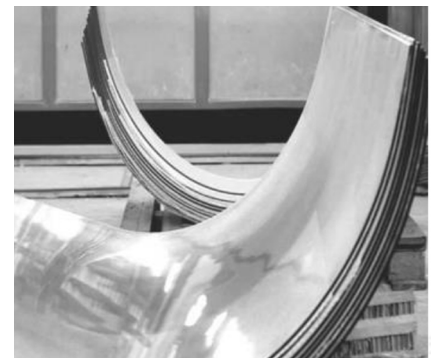
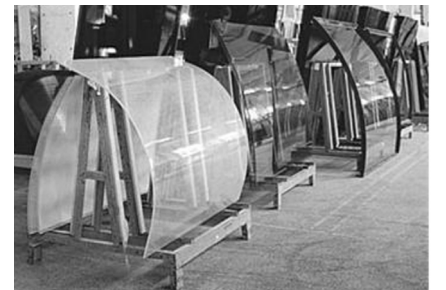
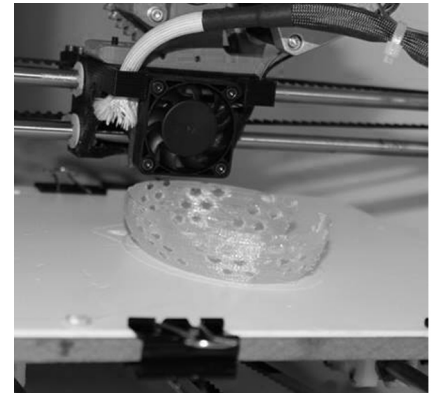
Per la fabbricazione di pannelli curvi è possibile distinguere tra tecniche *hot-bending* (piegatura a caldo) e *cold-bending* (piegatura a freddo). Nel primo caso è talvolta necessario considerare anche gli eventuali costi aggiuntivi per la produzione degli stampi.³¹

Il costo necessario per produrre uno stampo è più elevato del costo necessario per fabbricare un pannello curvo: pertanto, è importante mirare all'impiego di tecniche che consentano il riutilizzo di uno stampo per creare un numero elevato di pannelli.³²

Gli stampi possono essere suddivisi in tre tipologie differenti:³³ stampi statici, di cui il tipo più comune è realizzato in EPS/PS (polistirene), prototipato utilizzando una cutter CNC. Questa tecnica ha una elevata precisione, ma produce molto materiale di scarto; stampi in argilla o sabbia, dai quali deriva una bassa quantità di materiale di scarto, ma che non possono essere utilizzati per qualsiasi materiale;

stampi flessibili, riutilizzabili per la produzione di elementi con curvatura variabile e in diverso materiale.

Oggi, l'utilizzo di macchine automatiche a controllo numerico con-



4.39 - Tecnica RP: *slicing*
4.40, 4.41 - Esempi di lastre in vetro a singola e a doppia curvatura
4.42 - Pannelli in vetro a doppia curvatura su relativi stampi in poliuretano.

sente di raggiungere degli standard qualitativi molto elevati, con tolleranze di elevatissima precisione. Per la formatura dei fogli di metallo esistono diverse tecniche, classificate in relazione alla curvatura del pannello da produrre.³⁴

Per razionalizzare una superficie complessa, indipendentemente dal materiale scelto e per ragioni legate alla geometria curvatura delle superfici (cfr. cap. V), i pannelli cilindrici, dunque a singola curvatura, sono tecnologicamente ed economicamente preferibili. Di contro, dal punto di vista geometrico, i problemi legati all'ottimizzazione del paneling di superfici a doppia curvatura mediante distribuzione di elementi a singola curvatura non può essere risolto da qualsiasi software ad oggi disponibile in commercio.

Tuttavia, soprattutto nel caso di superfici vetrate, la fabbricazione di pannelli a doppia curvatura è preferibilmente da escludere per ragioni di fattibilità economica e di resistenza dei pannelli prodotti.

I software appositamente sviluppati permettono di verificare e di ridurre al minimo il rischio di rottura degli elementi derivante dalla deformazione del materiale, ed i relativi costi complessivi di produzione, consentendo comunque di rispettare il più possibile la morfologia delle superfici progettate. Attraverso la tecnica *hot bending* una lastra piana di vetro viene posta su uno stampo, a sua volta prodotto seguendo il raggio di curvatura desiderato, e viene surriscaldata ad una temperatura di circa 650°C.³⁵ A questa temperatura, il vetro raggiunge uno stato visco-plastico, perde la sua rigidità, e può essere modellato per gravità o per pressione meccanica secondo la geometria computata. Quindi, alla fase di piegatura segue la fase di raffreddamento.

Dopo essere stati piegati, i fogli possono essere laminati e assemblati. Attualmente le ricerche sono mirate ad ampliare i limiti di produzione in termini di controllo geometrico degli elementi (raggio, spessore) per offrire ad architetti e designer la possibilità di realizzare pannelli curvi di dimensioni maggiori.³⁶

A differenza dalle superfici a singola curvatura o sviluppabili, più semplici da produrre, per realizzare una forma sferica o a doppia curvatura variabile sono necessarie altissime temperature, ed i risultati non sempre sono attendibili.

La tecnica *hot bending* rappresenta la soluzione tradizionale da applicare nei casi in cui l'elemento presenti una curvatura elevata.³⁷ Le piegatrici di ultima generazione, le *glass bending machines* (fig.4.43, 45),

fabbricano pannelli in vetro temperato piegati a caldo, evitando la molteplice produzione di stampi volta per volta appositamente creati: l'uso di queste macchine è, dunque, chiaramente molto conveniente.³⁸ Il raggio di curvatura del pannello è automaticamente comunicato alla macchina e consente di ottenere una variazione della geometria dei pannelli da produrre a costi contenuti.³⁹ Un'altra caratteristica di queste macchine è che il pannello può essere introdotto in posizione inclinata rispetto all'asse della macchina, variando così la direzione di curvatura rispetto ai bordi laterali.⁴⁰

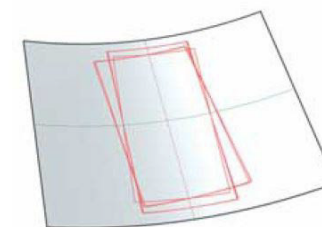
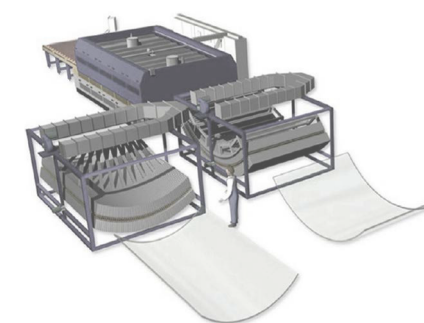
Le tecnologia *cold bending*, (piegatura a freddo), è più recente rispetto alle tecniche *hot bending*.⁴¹

I pannelli in vetro, in origine piani, vengono trasformati secondo la geometria desiderata mediante una pressione esercitata sulla lastra piana, a sua volta posizionata su uno stampo o su una guida, la quale può coincidere anche dalla stessa sottostruttura che reggerà il pannello. E' infatti possibile distinguere due tecniche: il vetro può essere curvato in fabbrica oppure in cantiere, curvando e fissando l'elemento sugli elementi che compongono la struttura o la sottostruttura del sistema.⁴² In conclusione, la tecnica di piegatura a freddo del vetro sfrutta la deformazione elastica delle lastre senza ricorrere al riscaldamento e alla plastificazione del materiale.

In un pannello laminato, la curvatura viene mantenuta dall'azione del materiale interstrato (PVB). Tuttavia, dopo che il pannello curvato viene rimosso dallo stampo, la curvatura inizialmente acquisita inizia gradualmente a ridursi a causa del ritorno elastico del materiale. Il comportamento a lungo termine del prodotto è principalmente legato alle proprietà visco-elastiche del materiale utilizzato per la fabbricazione delle lastre.

Le attuali ricerche e tecniche di verifica sfruttano la tecnica della fotogrammetria per rilevare il ritorno elastico dei pannelli curvati a freddo.⁴³ Le tecniche di piegatura a freddo rappresentano, dunque, la soluzione migliore per la fabbricazione di pannelli a singola curvatura. Tali tecniche offrono l'ulteriore vantaggio di evitare la distorsione ottica delle superfici, una conseguenza tipica delle tecniche di produzione dei pannelli piegati a caldo.⁴⁴

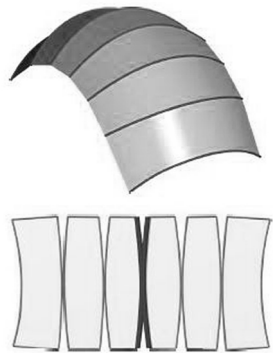
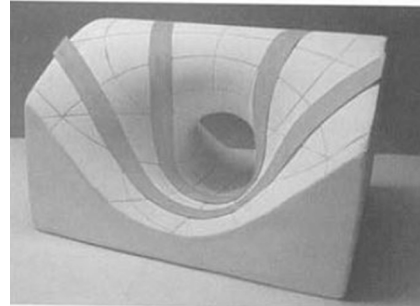
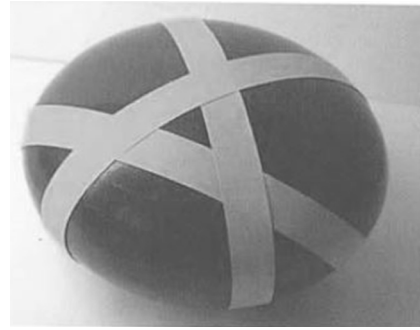
In generale, per la produzione di pannelli curvi, entrambe le tecniche di produzione presentano degli svantaggi: i processi di piegatura a caldo sono più costosi e più difficili da controllare in fase di fabbricazione, mentre le tecniche di piegatura a freddo sono più convenienti.



4.43 - *Glass bending machine*. Sistema di funzionamento.

4.44 - Sovrapposizione di diversi pannelli su uno stesso stampo cilindrico.

4.45 - *Bending and tempering machine*.



4.46,47 - Modello materiale per l'individuazione di strisce geodetiche estratte da una superficie a doppia curvatura

4.48 - Ogni striscia geodetica sviluppata avrà i bordi che presenteranno curvatura uguale e opposta rispetto ai bordi delle strisce adiacenti.

ti ma necessitano di un maggiore controllo geometrico necessario per l'estrazione o la computazione di strisce sviluppabili a partire da una superficie *free form*. Inoltre, uno dei limiti principali di queste tecnologie innovative è che, attualmente, esse sono solo in grado di fabbricare cilindri circolari. Inoltre, è inevitabile che si verifichino discontinuità di posizione, di tangenza e di curvatura tra pannelli adiacenti.⁴⁵ Tali limitazioni, al momento, sono controllate attraverso la computazione di paneling solutions che prevedono la distribuzione di pannelli cilindrici dalla dimensione limitata, la quale dipende dall'angolo individuato tra le generatrici della superficie ed i bordi del pannello. La minimizzazione della divergenza esistente tra due pannelli curvi adiacenti è una sfida importante dal punto di vista architettonico e tecnico, e coinvolge la qualità di fissaggio dei pannelli e l'impermeabilità del sistema.⁴⁶

Un altro metodo per produrre pannelli curvi è fabbricare delle strisce sviluppabili, tecnica che risulta particolarmente utile nei settori della nautica, dell'aeronautica e dell'automobilistica.

Le piastre realizzate in acciaio per gli scafi delle navi, ad esempio, sono sempre prodotte attraverso due possibili processi: *rolling*, o piegatura a freddo, e *hot bent*, o piegatura a caldo. Il taglio e la piegatura di strisce risulta particolarmente semplice se la laminazione del materiale è costante.

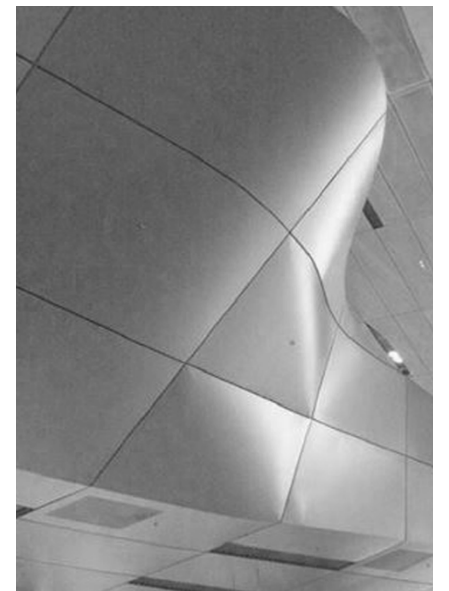
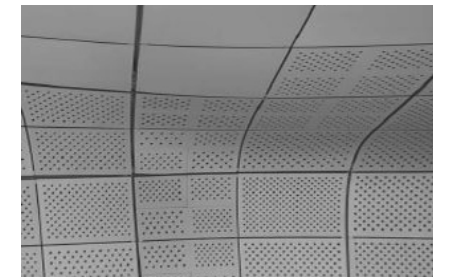
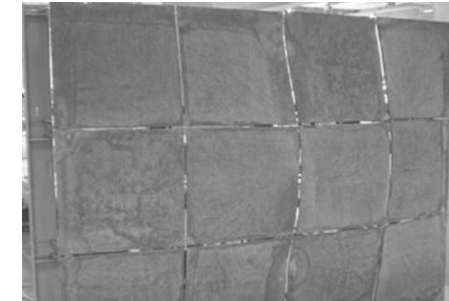
Il posizionamento delle fibre del materiale è un tema molto importante nel campo della produzione di materiali compositi.⁴⁷

Inoltre, se il materiale scelto per fabbricare le strisce ha un'elevata flessibilità, come ad esempio il metallo, il legno o i tessuti, il paneling della superficie mediante strisce di superfici sviluppabili rappresenta una soluzione ancora più vantaggiosa dal punto di vista economico. Sempre rimanendo in tema con la possibilità di discretizzare una superficie complessa mediante la fabbricazione di strisce piane di materiale successivamente curve, è importante segnalare il possibile uso delle curve geodetiche. (fig.4.46,47)

Le curve geodetiche rappresentano, da sempre, un mezzo per risolvere problematiche inerenti la progettazione e la costruzione architettonica.⁴⁸ Le strisce delimitate dalle curve geodetiche di una superficie sono modelli sviluppabili.

Data una superficie, una curva ad essa appartenente è un curva geodetica se le sue normali coincidono con le normali alla superficie negli stessi punti attraverso cui la curva passa. Nella sfera, infatti,

tutti i meridiani e l'equatore sono curve geodetiche della superficie, in quanto solo per queste circonferenze il raggio è costante, e quindi i cerchi osculatori e le normali delle curve e della superficie coincidono. I piani individuati dalle normali saranno pertanto perpendicolari alla porzione di superficie racchiusa dalle curve geodetiche. Ne consegue che ogni striscia avrà i bordi che presenteranno curvatura uguale e opposta, cioè speculare, rispetto ai bordi delle strisce adiacenti. Di conseguenza, lo sviluppo piano di queste strisce produce curve di bordo opposte e congruenti. (fig. 4.48) Le indagini sul campo sono ancora molto recenti, e non sono ancora disponibili procedure di tipo algoritmico, ma i ricercatori sono orientati verso il raggiungimento di questo obiettivo. Gli algoritmi per la computazione dei modelli semi-discreti, cioè per la razionalizzazione di una superficie complessa in strisce sviluppabili sono descritti all'interno del sesto capitolo. (cfr. cap.VI, 6.4)



4.49 - Multipoint stretch forming machine.
4.50,51 - Fase di montaggio e particolare di pannelli metallici a doppia curvatura fabbricati mediante la tecnica *Multipoint stretch forming*
4.52 - Parete del Mercedes Benz Museum, UN Studio. Pannelli a doppia curvatura.

4.53,54 - Esempio di stampo flessibile e riutilizzabile (membrana flessibile) per la produzione di pannelli a singola e doppia curvatura in materiale fibrorinforzati.

4.7 Riflessioni e risposte: *in medio stat virtus*

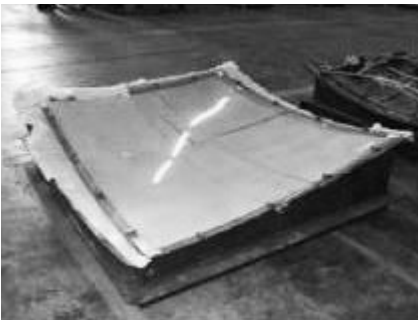
In conclusione, dagli studi condotti e dalle riflessioni sviluppate, risulta che la realizzazione di superfici complesse mediante la computazione di sistemi discreti genera dei risultati che inevitabilmente approssimano la “fluidità” delle forme originarie, la cui resa espressiva ed estetica spesso non soddisfa le esigenze dei progettisti e dei committenti. Questo pone l’accento sulla necessità di approfondire le ricerche rivolte alla computazione di sistemi discreti.

Nell’ambito dei sistemi composti da pannelli piani le ricerche sono orientate allo studio di sistemi preferibilmente autoportanti, che mirano alla sperimentazione di *pattern* diversi da quello triangolare, optando, dunque, per l’uso di *pattern* quadrangolari ed esagonali.

I casi studio mostrati all’interno del settimo e dell’ottavo capitolo e le sperimentazioni raccolte all’interno del nono capitolo offrono una possibile risposta al problema.

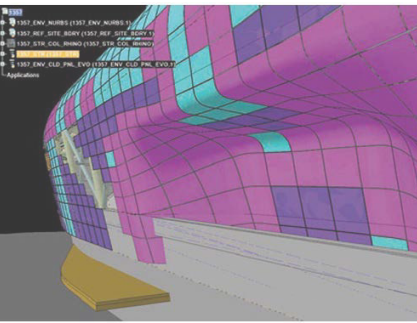
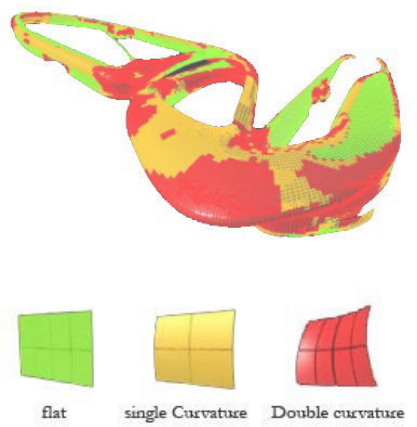
Dagli studi effettuati risulta inoltre che la fabbricazione di porzioni di superfici a doppia curvatura si rivela un approccio tecnologicamente poco conveniente, generando spesso problematiche emergenti sia in fase di costruzione che in fase di esercizio. Un esempio emblematico è rappresentato dall’ingresso della stazione della metropolitana *Gare Saint Lazare* di Arte Charpentier Architectes, a Parigi, nota come la *lentille*. Completata nel 2003, è un involucro realizzato mediante l’assemblaggio di pannelli in vetro a doppia curvatura, sagomati e piegati a caldo su stampi in acciaio,⁴⁹ parte dei quali sono stati oggetto di rottura. (fig.4.59,60) Dal confronto dei casi indagati si può, quindi, dedurre che la computazione e fabbricazione di pannelli a singola curvatura, rappresenta certamente la soluzione migliore per realizzare una superficie complessa mediante la distribuzione di pannelli curvi, più coerente con le intenzioni progettuali e in grado di minimizzare i costi e i rischi del processo. Dall’analisi dei casi analizzati e schedati si può dedurre che i casi più innovativi ed interessanti sono quelli in cui il passaggio dal continuo al discreto avviene computando soluzioni “ibride”. Si è quindi ritenuto opportuno descrivere più approfonditamente alcune di queste opere recentemente realizzate mediante l’assemblaggio di pannelli a singola curvatura o misti, in vetro o metallici. L’ordine di successione delle opere è dettato dalla crescente qualità di ottimizzazione delle soluzioni computate.

I



4.55
4.56,57 - La Gare Saint Lazare, Art Charpentier Architectes.
4.58 - Particolare. La foto mostra uno dei pannelli soggetto a rottura.
4.59 - Particolare della struttura.
4.60 - Pannello a doppia curvatura e relativo stampo

1 *Dongdaemun Design Park (DDP) building*,
Zaha Hadid, Patrik Schumacher - Seoul (Corea), 2014



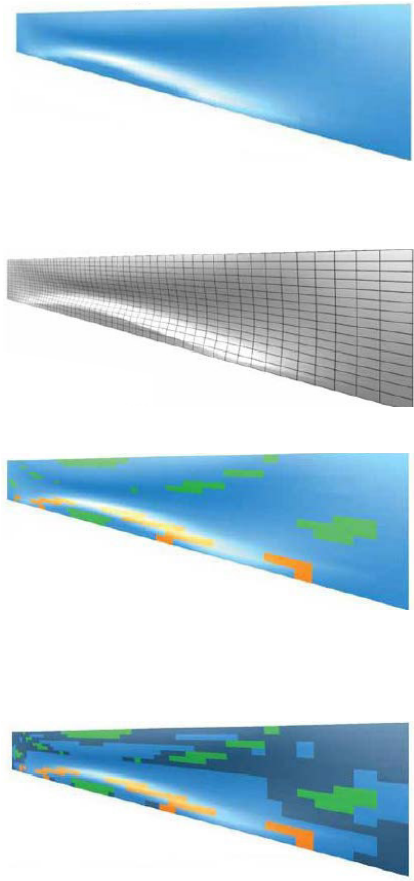
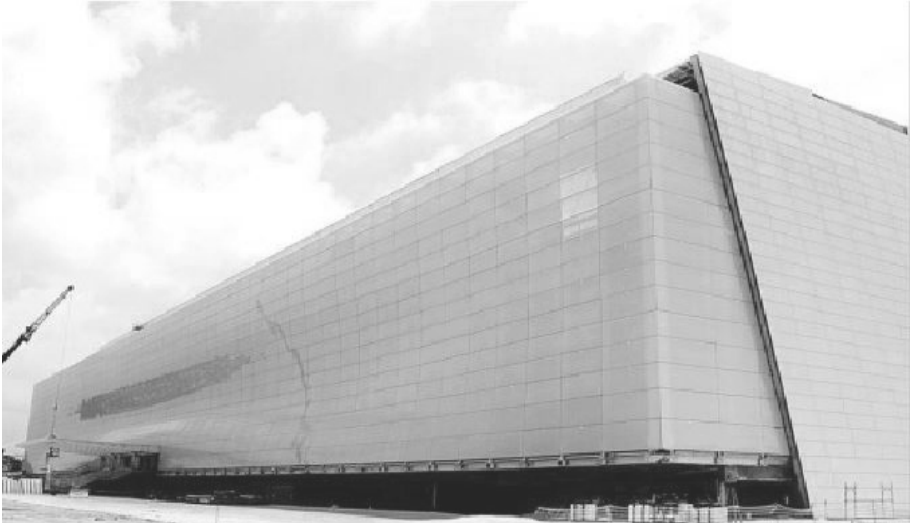
4.61 - Distribuzione della tipologia di pannelli curvi (piani, a singola e a doppia curvatura) sulla superficie a doppia curvatura.
4.62 - L'immagine mostra una schermata del software utilizzato per la computazione del sistema.
4.63, 64 - *Dongdaemun Design Park*. Vista d'insieme e particolare dei pannelli.

La fabbricazione di pannelli metallici a doppia curvatura è un processo molto complesso. Ghang Lee e Seonwoo Kim hanno studiato un metodo ad hoc per la fabbricazione dei pannelli curvi in alluminio che rivestono il Dongdaemun Design Park (DDP) building, progettato da Zaha Hadid. Precisione e un budget limitato sono stati i requisiti chiave. La superficie da costruire è notevolmente superiore a quella di altre costruzioni di forma complessa e i ricercatori hanno impiegato tre anni per sviluppare una tecnica di lavorazione a doppia curvatura della lamiera a prezzi e tempi accessibili.⁵⁰ Dei 45.000 pannelli complessivi, il 48,2% è a doppia curvatura, il 21,2% è a singola curvatura ed il 30,7% sono piani: dunque i pannelli a doppia curvatura coprono quasi la metà della superficie totale.⁵¹ Date le dimensioni dei pannelli da produrre, i metodi tradizionali utilizzati per la formatura delle lamiere mostravano diverse limitazioni per il raggiungimento dello scopo. Per la fabbricazione dei pannelli sono state messe a punto diverse macchine e numerosi prototipi: il team incaricato ha sviluppato con successo un apposito metodo innovativo per la formatura dei pannelli in lamiera a doppia curvatura, il *multipoint stretch forming* (MPSF) (figg.4.49,50,51).⁵² Questa tecnica, sfruttando il movimento automatizzato di un “campo” di perni regolabili in altezza, consente di deformare dei pannelli piani di lamiera di grandi dimensioni.⁵³ I perni rappresentano i punti che discretizzano la superficie curva: la loro posizione viene comunicata al sistema tramite il computer. Il metodo ha consentito di ridurre notevolmente i costi (260\$ vs 7000\$ mq/pannello) ed i tempi di fabbricazione. Tuttavia, è stato comunque necessario integrare diverse tecniche di fabbricazione per completare il risultato.⁵⁴

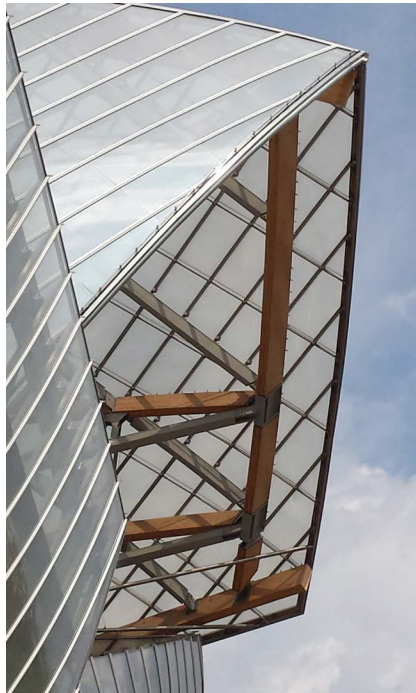
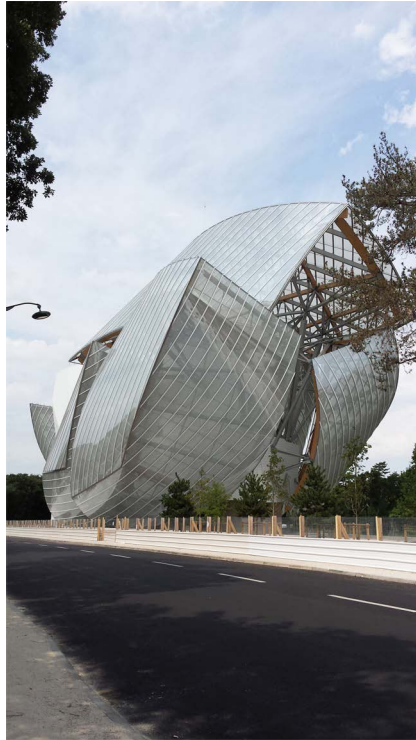


La facciata ovest dell'*Arena Corinthians*,
Anibal Coutinho - Sao Paulo, (Brasile), 2014

La facciata ovest dell'*Arena de Sao Paulo* (sfr. cap. I) è una superficie a doppia curvatura di 5400 mq, realizzata con pannelli in vetro prevalentemente di forma cilindrica. In una prima fase, la superficie è stata suddivisa in 855 pannelli a doppia curvatura: la sfida era quella di seguire esattamente il progetto formale dell'architetto minimizzando i costi. La soluzione è stata quella di optare per un uso predominante di pannelli a singola curvatura. Dei pannelli realizzati, l'84 % sono cilindrici, il 10 % sono piani e solo il 6% sono a doppia curvatura: questa distribuzione ha permesso di rispettare quanto più possibile la forma originaria della superficie. In conclusione, il 94% dei pannelli è stato prodotto utilizzando un processo industriale automatizzato, capace i costi complessivi e consentendo il riutilizzo degli stampi.⁵⁵



4.65 - La facciata ovest dell'Arena Corinthians: le figure mostrano la distribuzione ottimizzata dei pannelli sulla facciata. Le aree in blu scuro sono completamente ricoperte da pannelli cilindrici realizzati mediante l'utilizzo di un unico stampo, le aree verdi indicano la presenza di pannelli piani mentre le aree arancioni, nettamente inferiori, indicano la presenza di pannelli a doppia curvatura.
4.66, 67 - Viste della facciata particolare dei pannelli.



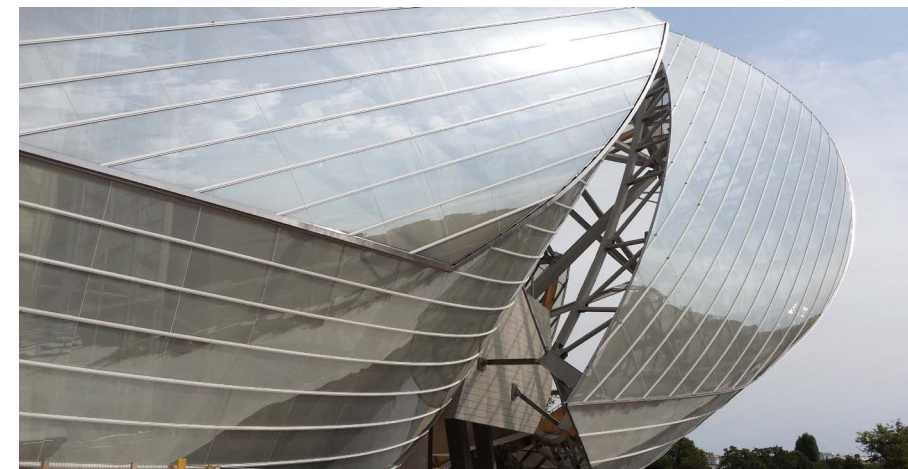
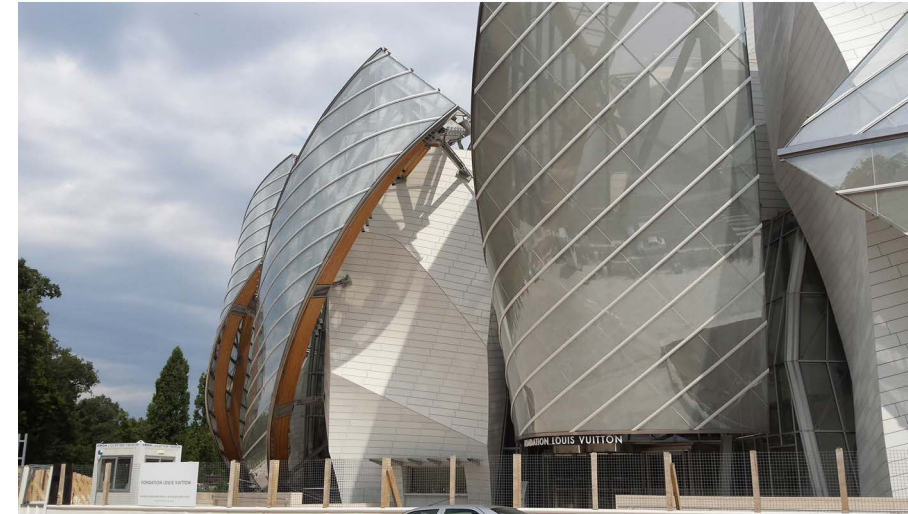
4.68 - La Fondazione Louis Vuitton, Parigi, 2014
4.69 - Particolare della struttura.
4.70, 71, 72 - Fondazione Louis Vuitton. Viste e particolari.

La *Fondation Louis Vuitton*,
Frank O. Gehry - Parigi, 2014

Le superfici-involucro realizzate per la *Fondazione Louis Vuitton*, rappresentano un esempio tecnologicamente molto avanzato, in cui “le geometrie tradizionali hanno una chiara ragion d’essere”.⁵⁷

L’ambiziosa struttura contiene delle gallerie d’arte, un auditorium e degli spazi di intrattenimento. L’involucro, un sistema portato, nasce dalla combinazione di elementi solidi (*iceberg*), intervallati da facciate vetrate (*vele*) le cui dimensioni variano da circa 500 mq a 3000 mq, per una superficie totale di circa 13400 mq. La struttura secondaria porta il carico principale dell’involucro ed è realizzata in legno lamellare, materiale scelto per contrastare l’importante presenza del vetro e dell’acciaio inossidabile della sottostruttura che regge i pannelli delle vele. Il modello in scala ridotta, le cui superfici sono state realizzate in plexiglass, mostra che ogni vela è composta dall’intersezione di due superfici sviluppabili: osservando attentamente il modello è possibile apprezzare la divergenza tra le due porzioni di superfici curve. Il prototipo è stato successivamente scansito, seguendo un processo di *reverse engineering*, e ricostruito in ambiente digitale. La forma e la dimensione dei singoli pannelli è stata definita dal profilo delle curve appartenenti alla rete di suddivisione della superficie. Ciascuno degli elementi ha inclinazione, raggio e direzione di curvatura diversi.⁵⁸ Tra le soluzioni prese in considerazione per la realizzazione dell’opera era prevista la fabbricazione di pannelli a doppia curvatura in vetro piegati a caldo, nel tentativo di seguire perfettamente la forma progettata per le vele.

Tuttavia, essi richiedevano la produzione di numerosi stampi in acciaio, ognuno diverso dall’altro: è evidente che tale soluzione era assolutamente proibitiva dal punto di vista economico. Pertanto, per realizzare i 3900 pannelli a singola curvatura distribuiti sulle 12 vele, sono state impiegate delle *glass bending machines* di ultima generazione, con notevole risparmio economico. Per gestire le aree con curvatura più accentuata è stato necessario forzare in loco, seppur minimamente, la piegatura a freddo di parte dei pannelli: la bassa curvatura della maggior parte degli elementi ha consentito l’applicazione di tale processo. Infine, la verifica dei pannelli è stata effettuata mediante analisi agli elementi finiti (FEM).⁵⁹





Il *Ponte della Pace*,
Michele De Lucchi – Tbilisi (Georgia), 2011



4.73,74,75,76 - Il Ponte della Pace, (Michele De Lucchi, 2011). Fasi di cantiere e particolare dei pannelli.

Il Ponte della pace (cfr. cap. I) è una superficie a doppia curvatura in vetro di circa 2000 mq ed è composta da 512 pannelli di dimensioni massime di 2500 x 2100 mm. Ciascun pannello è in vetro stratificato: la lastra all'estradosso, temprata, ha spessore 15 mm, mentre quella all'intradosso ha spessore 12 mm. I pannelli, giunti in cantiere piani, sono stati ancorati alla sottostruttura mediante quattro piccole clamps (morsetti) discoidali disposte lungo due dei quattro bordi laterali dell'elemento e curvati in fase di montaggio. In fase di progettazione è stato necessario verificare le tensioni locali a cui le lastre sarebbero state sottoposte durante il fissaggio e che avrebbero potuto causarne la rottura. Dopo il completamento delle principali attività di cantiere, il ponte è stato collegato alle fondazioni e in seguito l'opera è stata collaudata. Tutta la costruzione è stata completata in soli 239 giorni.⁵⁶

Il caso delle facciate degli *Eiffel Tower Pavilions*, progettate da Moatti & Rivière architects e ingegnerizzate da RFR in collaborazione con Evolute GmbH, rappresenta un esperimento avanzato di realizzazione di superfici complesse mediante la distribuzione di pannelli vetrati a singola curvatura, ed è inoltre stato oggetto di ulteriori esperimenti di *Panel Fitting*, (cfr. ccap. VI) attraverso cui i *geometry experts* del gruppo Evolute hanno computato la distribuzione di altre tipologie di superfici rigate per discretizzare la superficie a doppia curvatura originaria.

Grazie al materiale pubblicato in merito e alla disponibilità mostrata dalle figure coinvolte nel processo, il settimo capitolo è interamente



4.8 Oltre l'Architettura: ambiti di sperimentazione

A conclusione di questo capitolo dedicato al *paneling* di superfici complesse è interessante citare gli ambiti di sperimentazione che attualmente sono rivolti alla ricerca di soluzioni innovative. Il paneling di superfici complesse è un processo che favorisce ed esalta il carattere multidisciplinare dell'architettura.

Pertanto, è possibile indagarne l'applicazione all'interno di svariati, specifici settori, tra cui la progettazione e fabbricazione di sistemi di rivestimento, lo sviluppo di strutture pieghevoli e responsive, lo sviluppo di sistemi robotici creati per l'ottimizzazione della fase di assemblaggio dei manufatti, il settore della moda, dei puzzle 3D e la creazione di interessanti applicazioni nel campo della *landart*.

Tra i sistemi di rivestimento, *WoodSkin*⁶⁰ rappresenta un prodotto malleabile e di forte impatto estetico, interamente personalizzabile e capace di soddisfare molteplici esigenze progettuali. Tale sistema nasce dall'unione di elementi-sandwich, di forma variabile (triangolari, quadrilateri) di cui ciascuno è composto da due strati piani esterni di legno compensato e da uno stato interno in tessuto di nylon e polimeri: gli strati sono tenuti insieme da una sostanza adesiva.⁶¹

Le macchine CNC "frammentano" un pannello sandwich piano e rigido di partenza in maniera tale che questo possa successivamente adattarsi alla configurazione formale del progetto da realizzare.

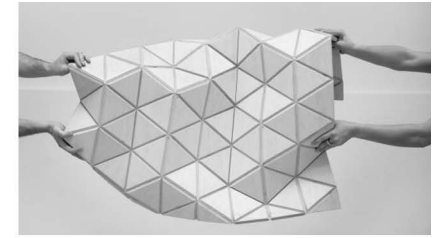
La piegatura dei singoli elementi prodotti è consentita dallo strato interno che lega gli elementi. Il sistema può essere utilizzato tanto per creare piccoli pezzi di design, quanto per sperimentare dei sistemi di rivestimento di intere facciate di edifici.⁶² (figg.4.77,78,79)

Da sempre, tra le tecniche impiegate per risolvere il problema della discretizzazione o della generazione di forme complesse, vengono sperimentate la pratica del folding e degli origami, capaci di generare "artefatti sottoposti a pieghe continue."⁶³ La rigida pieghevolezza degli origami, il cui studio delle tecniche ha origini molto antiche.

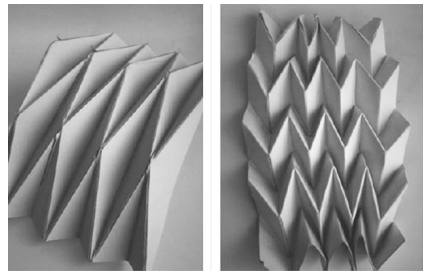
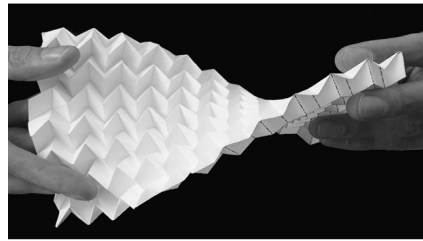
Il termine origami deriva dal giapponese *ori* piegare e *kami* carta: in unico concetto, "l'arte di piegare la carta".

La sola azione del piegare e del ridistendere su se stesso un foglio piano produce figure tridimensionali diverse, arrivando a definire una vasta varietà di forme, più o meno complesse.⁶⁴

La nota tecnica di piegatura rigida di fogli sottili di materiale è stata



4.77 - Il sistema *Woodskin*.
4.78,79 - Esposizione del prodotto.



4.80 - Flessibilità di un origami. (Miura pattern)
4.81 - Yoshimura pattern e Miura pattern.
4.82 - United States Air Force Academy Cadet Chapel, 1962, USA.
4.83 - Terminal Yokohama, FOA Architects, 2002

utilizzata in campo architettonico già nel XIX e XX secolo, sperimentando materiali tra cui il metallo ondulato e le piastre in calcestruzzo: i recenti progressi nella ricerca sui materiali e sull'ottimizzazione geometrica hanno determinato la ripresa di ricerche di metodi di discretizzazione e fabbricazione correlate alle tecniche dell'origami. Questo approccio si basa sulla discretizzazione di una superficie piana di partenza attraverso la distribuzione di un *pattern*, prevalentemente composto da elementi triangolari, in cui i bordi dei tasselli rappresentano le linee di piegatura, definite “*pieghe valle*” e “*pieghe monte*”, che permettono il dinamismo dell'intero sistema.⁶⁵ Il *Miura pattern* e lo *Yoshimura pattern* (fig. 4.81) sono due pattern capaci di consentire tale dinamismo.⁶⁶

Le pieghe, cioè i bordi tra elementi consecutivi, permettono la flessione e la torsione della superficie piana di partenza, trasformandola in una superficie a singola o a doppia curvatura, automaticamente già suddivisa.⁶⁷ Pertanto, è possibile assistere ad un'inversione del processo: dal sistema discreto si giunge alla forma complessa. Queste applicazioni rappresentano uno strumento interessante per sperimentare una vasta gamma di soluzioni nel campo delle strutture pieghevoli e responsive. Attualmente, molte sono le ricerche che si stanno concentrando sulla sperimentazione e sull'implementazione di questo tipo di meccanismi.

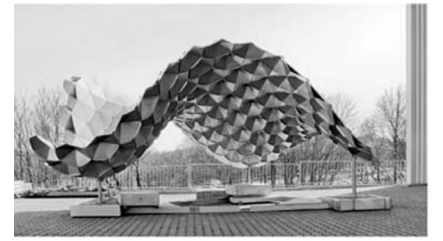
Henrik Joakim Zimmer, all'interno della sua tesi *Optimization of 3D Models for Fabrication*,⁶⁸ tratta lo studio e lo sviluppo di sistemi discreti dinamici e a doppio strato, definiti *Dual-layer spaces frames with planar faces*, sviluppati dalla RWTH Aachen University, in cui la flessibilità di uno degli strati consente il dinamismo dell'intero sistema (figg. 4.84, 85). Gli strati sono posti ad una certa distanza l'uno dall'altro. Le facce che definiscono il *pattern* di suddivisione della superficie corrispondente all'estradosso della superficie sono collegate tra loro dallo strato sottostante composto da elementi piramidali pieghevoli.⁶⁹ Le piramidi, nel caso in figura a base esagonale, generate dall'*offset* del vertice comune alle sei facce triangolari attraverso cui lo strato di base è stato suddiviso, è effettuato in direzione normale rispetto al poligono di base. Fisicamente, le piramidi sono state sagomate individualmente, una ad una, fissando un foglio di metallo su un supporto e piegandolo mediante l'uso di una macchina a controllo numerico.⁷⁰ Il sistema può essere esteso anche a *pattern* composti da elementi quadrangolari, esagonali o misti.⁷¹ Sempre nell'ambito del

paneling, alcuni gruppi di ricerca indagano e sperimentano la progettazione di sistemi e tecnologie robotiche autonome per “automatizzare” ed agevolare la fase di assemblaggio di strutture architettoniche. I robot, per anni impiegati nel settore della produzione industriale, oggi vengono utilizzati da ingegneri e architetti per la fabbricazione e l'assemblaggio delle loro strutture, in quanto rappresentano una soluzione utile per ottimizzare i tempi di realizzazione e di montaggio (fig. 4.86).⁷² L'assemblaggio manuale di tutti gli elementi è una procedura complessa, che necessita di un lavoro di raggruppamento, o *clustering*, dei pezzi, affinché il montaggio avvenga seguendo il giusto ordine di distribuzione.

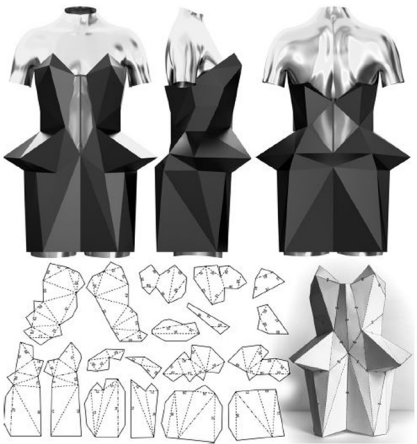
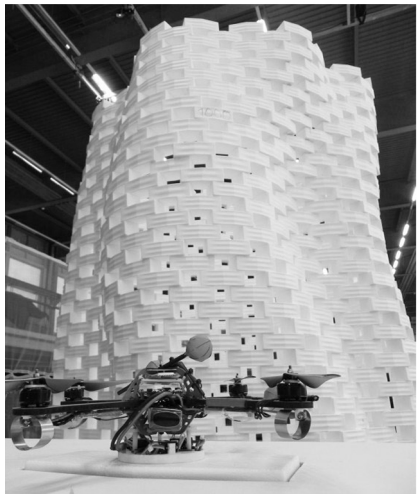
Tale ordine è stabilito in fase digitale, assegnando a ciascun pannello un codice numerico per riconoscerne la posizione rispetto a quelli adiacenti. Nel panorama mondiale, Fabio Gramazio e Matthias Kohler, entrambi docenti presso l'Istituto ETH di Zurigo, sono stati tra i primi ad utilizzare i robot nella progettazione architettonica, esplorando numerose tecniche di fabbricazione sottrattive e additive, e impiegando una vasta gamma di materiali.⁷³ I robot sono utilizzati per fabbricare tanto installazioni dalle dimensioni contenute, tanto strutture alla grande scala architettonica.⁷⁴

La conferenza *Rob/Arch*, tenutasi a Vienna, nel dicembre 2012, è un evento che dimostra e documenta il crescente interesse degli architetti verso il settore della robotica.⁷⁵ In questa sede i progettisti hanno potuto presentare i loro progetti di ricerca e partecipare a workshop organizzati presso le officine-partner dell'evento distribuite nelle città di diversi paesi europei nei quali questo settore di ricerca è molto forte, tra cui Rotterdam, Stoccarda, Graz, Zurigo e Vienna. Il progetto *KUKA/prc*, ad esempio, nato dalla collaborazione tra *KUKA*⁷⁶, *Rhinoceros* e *Grasshopper*, consente ai progettisti di simulare il controllo di robots e di bracci meccanici con un software noto per la modellazione NURBS e di simulare gli attuali processi di fabbricazione digitale. Sempre Gramazio & Kohler, in collaborazione con Raffaello d'Andrea, a Orléans (Francia), hanno curato il progetto *Flight Assembled Architecture*, in cui una serie di *quadrotor*⁷⁷ sono stati utilizzati per assemblare una torre di 1500 blocchi di polistirolo espanso, raggiungendo fino a 6m di altezza e 3,5 m di larghezza. (fig. 4.88, 89)

Anche Stephen A. Gage⁷⁸ e Will Thorne⁷⁹ esplorano le potenzialità della robotica per la realizzazione di facciate automatizzate per gli



4.84, 85 - Trade Fair, Hexagon-based point-folded structure. Progetto del RWTH Aachen University
4.86



4.88 - *Qadrotor*
4.89 - *Flight assembled architecture*, G&K, R. D'Andrea, 2013.
4.90 - Modellazione numerica, sviluppo (in *Pepakura Designer*) e ricostruzione del prototipo cartaceo di un abito progettato da Irina Shaposhnikova, 2009.
4.91 - *Wooden dress*, A. Walker

edifici: lo scopo è mirare alla sostenibilità del sistema. L'ambizione è quella di lavorare con dei sistemi robotici altamente sofisticati che possano essere impiegati direttamente in cantiere, dunque in condizioni spaziali ristrette e complesse.⁸⁰

I processi di discretizzazione delle superfici sono attualmente adottati anche nel settore del design e della moda. (fig.)

*“Del resto le sue superfici sono affini a quelle dell'architettura poiché entrambe le discipline lavorano sul corpo: gli abiti possono considerarsi come architetture che lo vestono e lo ridisegnano, nel frattempo i luoghi da abitare assumono le sembianze di ibridi antropomorfi.”*⁸¹

Grazie agli sviluppi nel campo della computer grafica, è possibile simulare modelli tridimensionali di capi d'abbigliamento utilizzando dei manichini virtuali per definire le collisioni eventualmente esistenti tra le parti del corpo e del capo disegnato.⁸² Pertanto, dal momento che qualsiasi superficie NURBS è convertibile in un poliedro, la forma modellata può essere successivamente fabbricata tramite taglio o stampa 3D dei singoli elementi che discretizzano la superficie originaria. Riprendendo le procedure applicate per la creazione ed il controllo digitale degli origami, alcuni software, appositamente creati, trasformano i modelli 3D in un formato 2D stampabile ed assemblabile. Questi software, tra cui *PepakuraDesigner*⁸³, permettono di indicare i profili di suddivisione delle mesh precedentemente importate e di sviluppare il pattern di suddivisione della superficie indicando i tratteggi delle pieghe che lo strutturano, in maniera da consentire la creazione di un modello cartaceo del prototipo da realizzare.⁸⁴ Il processo si rivela utile tanto nel campo della moda, quanto per l'architettura.

Attualmente, il legno sembra rappresentare un materiale interessante per sperimentare nuove soluzioni.

Alcuni talentuosi stilisti e designer contemporanei utilizzano tale tecnica per progettare e realizzare le proprie collezioni: è possibile citare il progetto *Wooden Skin Tone Dress* di Allison Walker,⁸⁵ i modelli *Wooden Bag and Dress* delle designer Maria Bonita ed Elisa Stroyk, i *Woodendress* di Thrive,⁸⁶ ed i *Wooden Textile Dress* di Léa Peckre & Elisa Stroyk.⁸⁷ (figg.)

Tutti questi progetti sono realizzati assemblando tasselli di forma triangolare o quadrilatera, tagliati in maniera tale da assecondare la complessità delle forme progettate e per riproporre le proprietà di flessibilità, malleabilità e adattabilità proprie di un tessuto.

I tasselli sono successivamente agganciati o incernierati gli uni agli altri, oppure sono incollati su un tessuto molto fine: il risultato è una superficie trasformabile.⁸⁸

Lo studio di design Nervous System, grazie al software *Kinematics*,⁸⁹ combina la tradizionale tecnica degli origami con i nuovi approcci di stampa 3D. (fig.)

Appositi algoritmi aggiungono le cerniere ai triangoli che discretizzano la forma in maniera da congiungere tutti gli elementi: lo scopo è quello di estrarre un unico pezzo finale da un blocco di nylon, senza bisogno di alcuna successiva fase di assemblaggio dei pezzi.

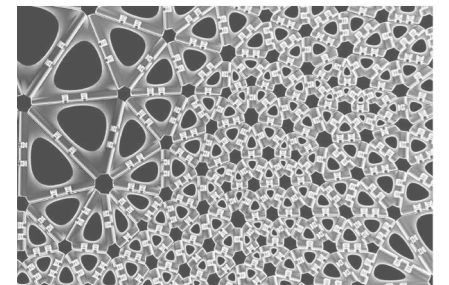
Un'altra interessante applicazione del sistema nell'ambito della moda è rappresentato dalle creazioni di Michael Schmidt e Francis Bitonti, la cui realizzazione, sempre in nylon, è stata eseguita ancora una volta grazie alla stampante *3D Shapeways*. I capi sono disegnati seguendo misure del corpo della modella, acquisito mediante scansione 3D, modellato digitalmente e poi stampato in 3D.⁹⁰

Anche Bradley Rothenberg, architetto di New York, propone dei vestiti stampati in 3D, trasformando materiali come l'elastomero termoplastico e il poliuretano termoplastico per realizzare capi indossabili. Tuttavia, in questo caso i tessuti nascono da un intreccio di fili stampati in 3D, i quali formano una rete che può raggiungere varie configurazioni, dimensioni e forme, permettendo al tessuto di muoversi liberamente assieme al corpo.⁹¹

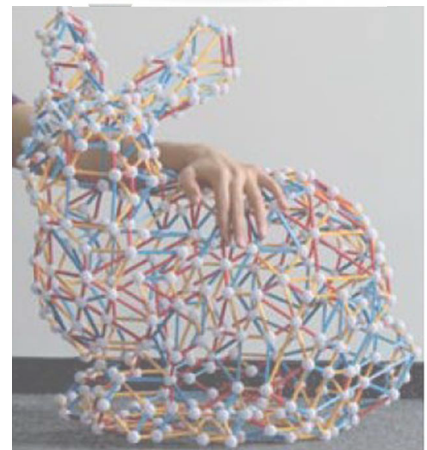
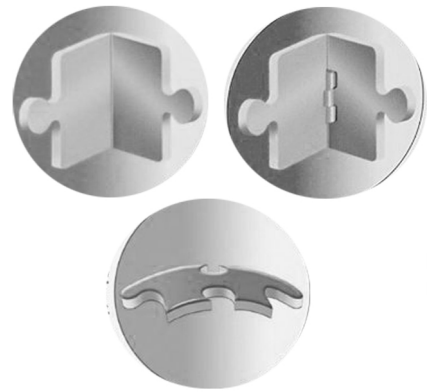
Gli abiti stampati in 3D sono già stati esibiti, ma rappresentano ancora dei prototipi: i designer stanno studiando diverse tipologie di materiali, testandone le proprietà.

La necessità di una progettazione consapevole delle forme complesse ha determinato un crescente interesse verso la creazione di appositi, intuitivi strumenti fisici di controllo, richiamando la realizzazione di sistemi che consentano la creazione di modelli materiali per la gestione geometrica di tali oggetti.

Nell'ambito dei giochi, vari sono i sistemi basati sulla frammentazione e ricomposizione di figure. Una variante interessante è rappresentata dai *puzzle* 3D, attraverso i quali è possibile ricostruire una forma solida, spesso la riproduzione di un palazzo o un monumento famoso, componendo fra loro nel giusto ordine un gran numero di pezzi, realizzati generalmente in fibra di plastica. I pezzi, piani o curvi, talvolta dotati di cerniera per consentire la realizzazione degli angoli, sono prodotti per seguire la geometria dell'oggetto da ricom-



4.92 - *Nervous System*, abito creato con *Kinematics*.
4.93 - Léa Peckre & Elisa Stroyk
4.94 - Tasselli di *Puzzle 3d*



4.95,96 - Sistema Zometool: modello digitale e materiale.
4.96

porre e sono assemblabili grazie a specifici sistemi ad incastro, senza bisogno di colle aggiuntive (fig.).⁹² Alcuni *puzzle* 3D sono appositamente ideati per la creazione di strutture fisiche dotate di simmetria, come nel caso delle molecole e dei reticoli cristallini. Questi sistemi non trovano impiego solo nel campo della ricerca o per scopi didattici, ma anche per la progettazione e fabbricazione personale di oggetti complessi, ideati, modellati, discretizzati e poi fisicamente ricomposti: attraverso appositi software è possibile gestire virtualmente tutte le fasi. Il sistema Zometool⁹³ (fig.4.95,96), ad esempio, attraverso un numero limitato di nodi e di aste disponibili, consente la realizzazione di una vasta gamma di strutture geometricamente complesse.

Le aste presentano lunghezze differenti, mentre la geometria del nodo corrisponde a quella di un rombicoidodecaedro, poliedro capace di consentire maggiore flessibilità e varietà di forme realizzabili.⁹⁴

Note

¹ B. Munari, *Design e comunicazione visiva*, p. 53

² M. Rossi, *Realtà e immaginazione: nuove forme e antiche simmetrie*, in *Disegnare*, n.38, Gangemi Editore, p. 50

³ *Ibidem*

⁴ M. C. Escher, *Grafica e Disegni*, Benedikt Taschen, 1990, pp.7-8

⁵ M. Rossi, *Op. cit.*, pp.52-59

⁶ Si tralascia volutamente lo studio dei pattern decorativi, ampiamente trattati all'interno di numerosi studi, ricerche e pubblicazioni in merito.

⁷ V. Valeri, *Corso di Disegno*, La Nuova Italia, 1995, p.74

⁸ *Ibidem*, p.79

⁹ Il termine può essere tradotto anche come “cerchio-circonferenza” o “ciclo”. Il mandala riveste un significato spirituale e rituale sia nel Buddhismo che nell'Hinduismo” - <http://it.wikipedia.org/wiki/Mandala>

¹⁰ cfr. L. Grigis, *Evoluzione del mosaico*, Atlas

¹¹ M. Fileti Mazza, *Il mosaico tra passato e presente*, in *Minuti Menarini*, n° 320 – maggio 2005

¹² R. Catuogno, *Luce, forma e struttura: la geometria come processo conoscitivo dell'opera di Gaudì*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Tecnologia e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente (XIX ciclo), Facoltà di Architettura, Università degli Studi

di Napoli, pp. 31-38

¹³ Nel 2005, il Centro Internazionale di Documentazione sul Mosaico ha creato un archivio online intitolato *Databank Mosaicisti Contemporanei*, una banca dati per cercare informazioni e immagini relative agli artisti contemporanei e alle loro opere.

¹⁴ cfr. M. Tosi, *Il mosaico contemporaneo: tradizione, evoluzione, tecnica e conservazione*, Mondadori, Milano, 2004

¹⁵ B. Munari, *Fantasia*, pp. 144 – 145

¹⁶ A. Shiftner, N. Leduc, P. Bompas, N. Baldassini, M. Eigensatz, *Architectural Geometry from Research to Practice: The Eiffel Tower Pavilions*, in *Advances in Architectural Geometry 2012*, a cura di Hesselgren, Sharma, Wallner, Baldassini, Bompas, Raynaud, 2012, pp. 216-220

¹⁷ *Ibidem*

¹⁸ N. Baldassini, *Geometry, mechanics and the environment: integrated transparent thinking*, in *Laminated Glass/Process/Design*, Glass Performance Days 2009 - www.gpd.fi, p. 717

¹⁹ H. Pottman, *Chapter 15: Developable surfaces and unfoldings*, in *Architectural Geometry*, pp. 534-535 - <http://ajspringer.blogspot.it/2012/10/reading-05-chapter-15-developable.html>

²⁰ J. Glymph, D. Shelden, C. Ceccato, J. Mussel, H. Schober, *A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets*, in *Automation in Construction* 13 (2004), pp.194-199

²¹ M. Aris Carlos, *La centina e l'arco. Pensiero, teoria, progetto in architettura*, Marinotti Editore, 2007

²² H. M. N. Afify, Z. A. ABD Elghaffar, *Advanced digital manufacturing techniques (CAM) in architecture authors*, Ain Shams University, Egypt, pp.76-77

²³ I. Paoletti, *Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura*, Libreria CLUP, Milano, 2006, p. 198

²⁴ L. Ghang, K. Seonwoo, *Case Study of Mass Customization of Double-Curved Metal Façade Panels Using a New Hybrid Sheet Metal Processing Technique* - 1322 / *Journal of construction Engineering and management* © ASCE / November 2012

²⁵ *Nesting* - <http://www.garzantilinguistica.it>

²⁶ *Nesting. Ottimizzazione di pannelli in legno* - <http://www.dietrichs.com/it/applicazioni/prodotti>

²⁷ *RhinoNest* - <http://www.tdmsolutions.com/rhionest/>

²⁸ A. Tedeschi, *AAD_Algorithms – Aided Design*, Le Penseur Publisher, 2014, pp. 309-319. Il paragrafo 8.1 *Fabrication Techniques* riporta una sintesi delle tecniche *Bi-dimensional cutting*, sottrattive e additive.

²⁹ A. Tedeschi, *Op. cit.*, p 313

- ³⁰ A. Tedeschi, *Op. cit.*, p. 316
- ³¹ D. Tonelli, *Sinossi sull' ingegneria delle forme libere*, Marzo 2012, p.4
- ³² M. Eigensatz, A. Schiftner, *Paneling the Eiffel Tower Pavilions. Case Studies in Optimization of Glass-panelized Architectural Freeform Designs for the Eiffel Tower Pavilions* (febbraio 2012) - www.glassonweb.com/articles/article/765/
- ³³ A. Pronk, I. van Rooy and P. Schinke, *Double-curved surfaces using a membrane mould*, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia, 2009
- ³⁴ L. Ghang, K. Seonwoo, *Case Study of Mass Customization of Double-Curved Metal Façade Panels Using a New Hybrid Sheet Metal Processing Technique* - 1322 / Journal of construction Engineering and management © ASCE / November 2012, p.1328
- ³⁵ R. Cilento, *Façade engineering blog* (2011), <http://renatocilento.blogspot.it/2011/08/glass-curved-technology.html>
- ³⁶ *Ibidem*
- ³⁷ *Ibidem*
- ³⁸ B. Vaudeville, M. King, S. Aubry, J. Raynaud, M. Chalaux, A. Witt, *How Irregular Geometry and Industrial Process Come Together: A Case Study of the "Fondation Louis Vuitton Pour la Creation", Paris*, in *Advances in Architectural Geometry 2012*, p. 284
- ³⁹ Nicolas Leduc, Jacques Raynaud, Niccolo Baldassini, *Project for the Eiffel Tower: Constructive Geometry*, in Bas, Louter, Nijse, Challenging Glass 3 - Conference on Architectural and structural applications of glass, IOS Press, 2012, p. 96
- ⁴⁰ *Ibidem*
- ⁴¹ R. Cilento, *Op. cit.*
- ⁴² *Ibidem*
- ⁴³ *Ibidem*
- ⁴⁴ T. Fildhuth, J. Knippers, F. Bindji, Odzili, N. Baldassini, S. Pennetier, *Comportamento del vetro laminato piegato a freddo-analisi numerica e test*, in Challenging Glass 4, Cost Action, TU0905, Final Conference-Louter, Bos, Belis & Lebet (EDS), Taylor & Francis Group, London, 2014, Introduzione
- ⁴⁵ N. Leduc, J. Raynaud, N. Baldassini, *Project for the Eiffel Tower: Constructive Geometry* in Bos, Louter, Nijse, Challenging Glass 3 - Conference on Architectural and structural applications of glass, IOS Press, 2012, p.98
- ⁴⁶ *Ibidem*
- ⁴⁷ H. Pottmann, A. Schiftner, P. Bo, H. Schmiedhofer, W.Wang, N. Baldassini, J. Wallner, *Freeform surfaces from single curved panels*, pp. 9-10
- ⁴⁸ L. Baglioni, *Op. cit.*, in R. Migliari, *Geometria Descrittiva*, p. 299
- ⁴⁹ N. Baldassini, J. Raynaud, *Free-form, form finding and anisotropic grid shell*, in *Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures*, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia, p. 967

- res, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia, p. 967
- ⁵⁰ L. Ghang, K.Seonwoo, *Case Study of Mass Customization of Double-Curved Metal Façade Panels Using a New HybridSheet Metal Processing Technique* - 1322 / Journal of Construction Engineering and Management © ASCE / November, 2012
- ⁵¹ *Ibidem*
- ⁵² Z. Yi Cai, S.Hui Wang, X. Dong Xu, M. Zhe Li, *Numerical simulation for the multi-point stretch forming process of sheet metal*
- ⁵³ *Ibidem*
- ⁵⁴ L. Ghang, K.Seonwoo, *Op. cit.*
- ⁵⁵ A. Schiftner, M. Eigensatz M. Kilian, G. Chinzi, *Large scale double curved glass façades made feasible — The Arena Corinthians West Façade, Sao Paulo, in Glass Performance Days 2013* | www.gpd.fi, p. 523
- ⁵⁶ C. Colleoni, *Dal progetto alla realizzazione: ottimizzati soluzioni e tempi*, (4 ottobre 2011) www.edilizianews.it/articolo/54/dal-progetto-alla-realizzazione-ottimizzati-soluzioni-e-tempi
- ⁵⁷ B. Vaudeville, M. King, S.Aubry, J. Raynaud, M. Chalaux, A. Witt, *Op. cit.*, pp.279-294
- ⁵⁸ *Ibidem*
- ⁵⁹ *Ibidem*
- ⁶⁰ Il sistema di rivestimento *WoodSkin* è il risultato di una ricerca condotta dai giovani designer dello studio milanese Mamma Fotogramma. Lo studio sta lavorando allo sviluppo del prodotto, per raggiungere nuove possibilità realizzative per l'architettura e per il design.
- ⁶¹ L. Torri, *Woodskin: come un tessuto di legno* (20 marzo 2014) <http://www.leotorri.com/interiordesign/wood-skin-come-un-tessuto-di-legno/>
- ⁶² *Ibidem*
- ⁶³ M. Ciammaichella, *Processi di sviluppo delle superfici - Architettura e moda a confronto*, in *Geometria Descrittiva e Rappresentazione Digitale - Memoria e Innovazione* – volume secondo, a cura di Andrea Casale, Edizioni Kappa, luglio 2013, p. 163
- ⁶⁴ A. Casale, G. Mario Valenti, *Architettura delle superfici piegate - Le geometrie che muovono gli origami*, con il contributo di M. Calvano, Edizioni kappa, Roma, 2012, Prefazione
- ⁶⁵ *Ibidem*
- ⁶⁶ *Ibidem*
- ⁶⁷ *Ibidem*
- ⁶⁸ P.H. J. Zimmer, *Optimization of 3D Models for Fabrication*, Diplom-Informatiker, 2004, p.51

⁶⁹ *Ibidem*, p. 57

⁷⁰ *Ibidem*, p.83

⁷¹ *Ibidem*

⁷² cfr. Gramazio & Kohler, R. D’Andrea, *Flight Assembled Architecture* - Editions Hyx, (22 Marzo 2013)
<http://www.gramaziokohler.com/web/d/publikationen/index.html>

⁷³ *Ibidem*

⁷⁴ cfr. M. Waibel, *Architects Using Robots to Build Beautiful Structures*, 2011-<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/robots-in-architecture>

⁷⁵ *Rob/Arch*, Vienna, (dicembre 2012)

⁷⁶ KUKA è un produttore tedesco a livello mondiale di robot industriali e soluzioni per l’automazione industriale. La società KUKA Robotics ha 25 filiali in tutto il mondo. Il nome KUKA, è un acronimo per *Keller und Knappich Augsburg* ed è, allo stesso tempo, il marchio registrato che si trova sui robot industriali e altri prodotti realizzati da KUKA. La società è stata fondata nel 1898 ad Augusta, Germania, da Johann Josef Keller e Jacob Knappich. Nel 1973 KUKA inventò il primo robot industriale al mondo, FAMULUS.

⁷⁷ Un quadrirotore, o anche elicottero quadrirotore (in inglese: *quadrotor*), è un aeromobile sollevato e spinto da quattro rotori. Questi velivoli utilizzano un sistema di controllo e dei sensori elettronici per stabilizzarsi. Grazie alle loro ridotte dimensioni e all’agilità di manovra, possono esser fatti volare tanto in luoghi chiusi, tanto all’aperto.

⁷⁸ Stephen Gage è professore di tecnologia innovativa alla Bartlett School of Architecture, University College di Londra.

⁷⁹ Will Thorne si laurea al Machintosh di Glasgow. Esegue ricerche nel campo della costruzione di edifici ecosostenibili

⁸⁰ C. Molloy, *Robots Revolutionizing Architecture’s Future*, 28 Feb 2013, *ArchDaily* - <http://www.archdaily.com/?p=336849>

⁸¹ M. Ciammaichella, *Op. cit.*, p. 190

⁸² *Ibidem*, p. 191

⁸³ <http://www.tamasoft.co.jp/pepakura-en/>

⁸⁴ M.Ciammaichella, *Op. cit.*, p.193

⁸⁵ A. Walker, *WoodenDress - Materials & Wearables: “WoodenDress”*
http://alliwalk.com/wooden_dress.html

⁸⁶ *Wooden Fashion is in!* (12 marzo 2014)
<http://www.dotcomwomen.com/beauty/wooden-fashion-is-in/17444/>

⁸⁷ *Wooden Textile Dress – Léa Peckre & Elisa Strozyk* (21 gennaio 2013)
<http://www.wmnetwork.fr/wooden-textile-dress-lea-peckre-elisa-strozyk/>

⁸⁸ *Ibidem*

⁸⁹ Kinematics (26 novembre 2013) - <http://n-e-r-v-o-u-s.com/blog/?p=4467>

⁹⁰ <http://www.francisbitonti.com/ditas-gown/>

⁹¹ <http://www.bradleyrothenberg.com/>

⁹² <http://www.ravensburger.com/it/puzzle/3d-puzzle/index.html>

⁹³ P. H. J.Zimmer, *Op. cit.*, p. 87

⁹⁴ *Ibidem*

I principi geometrici

Manca di mentalità matematica tanto chi non sa riconoscere rapidamente ciò che è evidente, quanto chi si attarda nei calcoli con una precisione superiore alla necessità.

Carl Friedrich Gauss

5.1 La rivelazione delle superfici

Per razionalizzare una superficie complessa è fondamentale procedere dalla sistematizzazione dei principi geometrici elementari: è sulla regola geometrica che si fonda la sintassi del progetto, capace di legare forma, struttura e materiali.

A tal proposito, la Geometria Descrittiva rappresenta lo strumento principale attraverso cui l'architetto esercita in maniera consapevole tale controllo.

Da ciò deriva l'esigenza ed il tentativo di tradurre il linguaggio implicito della matematica e dell'informatica attraverso la descrizione grafica dei principi geometrici coinvolti nei processi.

Pertanto, favorire lo sviluppo di nuovi approcci per l'insegnamento della Geometria Descrittiva o della Matematica applicata rappresenta dunque un obiettivo fondamentale per l'individuazione di soluzioni innovative a partire dalla conoscenza dei principi di base.

Lo scopo è mirare all'applicazione e allo sviluppo di metodi efficaci, utilizzando in maniera innovativa gli strumenti più avanzati e attualmente disponibili.

La gestione grafica e la comunicazione visiva di informazioni favorisce la manipolazione dei dati derivanti da tali strumenti.

Gli strumenti diagnostici forniti dai modellatori CAD, ad esempio, possono assumere il ruolo di veri e propri strumenti progettuali, utili

per generare risposte ottimali per la gestione di oggetti apparentemente indecifrabili, ma strutturati su codici estremamente definiti.

5.1.1 Esperimenti di sensibilizzazione

Nel campo della progettazione delle forme complesse, *“la superficie è in grado di dettagliare le forme in maniera molto più raffinata rispetto alla modellazione solida.”*¹

La rigidità dei principi che regolano la distribuzione di un pattern geometrico quasi sempre collide con la natura delle superfici *free form*. Pertanto, le esigenze di tipo strutturale e costruttivo, a cui l'architettura è fondamentalmente legata, esigono un equilibrio geometrico che consenta la realizzazione fisica delle superfici o della superficie che sostanziano la forma dell'oggetto ideato.

Graficizzare una superficie attraverso una rete di curve equivale ad esplicitarne la natura geometrica e con essa le potenzialità, allo scopo di favorirne la manipolazione consapevole.

Visualizzare tali informazioni è fondamentale per dimostrare l'esistenza o meno di una condizione di equilibrio, sufficiente o assolutamente da migliorare.

E' importante riflettere sull'esistenza di una possibile, sottile differenza esistente tra un *pattern* ed una *texture*.

Data una superficie, un *pattern* è un veicolo che consente la comunicazione di informazioni. Il pattern rappresenta il codice, la serie di segni attraverso cui è possibile scomporre e comunicare un'informazione complessa in elementi più semplici e riconoscibili, mentre, più generalmente, la *texture* è caratterizzata da un gioco infinito di linee che, intrecciandosi, formano una tessitura.²

Una *texture* può derivare dal trattamento “casuale” di una superficie; mentre un *pattern* esplicita le relazioni poste alla base contenuto. Pertanto, le reti di curve “estratte” da una superficie rappresentano un pattern: infatti, le eventuali anomalie che rompono la regolarità di questa rete si trasformano in successive limitazioni in fase di discretizzazione.

Sensibilizzare una superficie, significa favorire i fenomeni visivi di “rarefazione” e di “addensamento” che favoriscono la trasmissione di un messaggio.³

Significa tracciare un segno, delimitare un confine, imporre un'intenzione o lasciare un'impronta.

La sensibilizzazione di una superficie può nascere indipendentemente dalla comunicazione di una serie di informazioni di carattere scientifico o oggettivo. Esistono, infatti, approcci di sensibilizzazione soggettivi, che alterano l'efficacia della comunicazione del messaggio.

*“Un foglio di carta bianco presenta una superficie poco interessante se è liscia, più interessante se è rugosa, più interessante ancora se queste rugosità hanno un andamento strutturale riconoscibile [...]. Ogni cosa che l'occhio vede ha una sua struttura di superficie e ogni tipo di segno, di grana, di zigrinatura, ha un suo significato ben chiaro.”*⁴

Queste riflessioni suggeriscono l'approfondimento dei processi e degli approcci che favoriscono la capacità comunicativa delle superfici. Diversi artisti del secondo dopoguerra, seguaci di Lucio Fontana, hanno lavorato sulla sensibilizzazione di superfici monocromatiche, utilizzando differenti materiali e generando suggestioni e libere interpretazioni. La loro arte sperimentale sulla percezione visiva viene sviluppata collettivamente, attraverso la ricerca di nuovi mezzi espressivi che si basano sullo sviluppo di esperimenti non figurativi. L'arte Informale, attraverso i suoi tre filoni, “metrico”, “gestuale” e “segnico”, avvia un lavoro di triplice ricerca sul potere comunicativo della superficie intesa non più come oggetto su cui imprimere delle immagini ma come supporto utile per esprimere significati.⁵

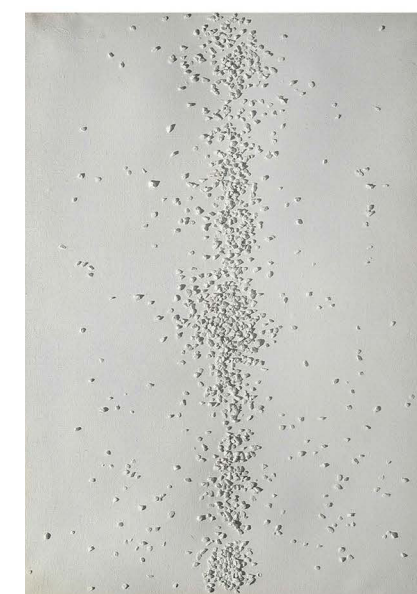
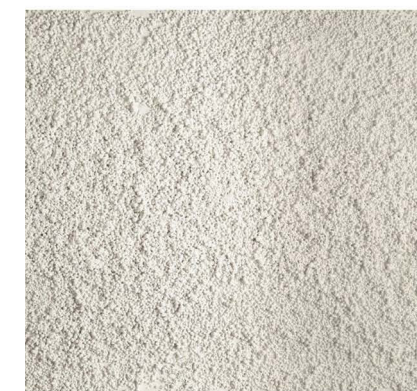
La ricerca di un linguaggio che sia capace di rimanere fedele ad un'interiorità comporta talvolta la perdita di ogni figurazione oggettiva e di ogni soggetto riconoscibile, approdando all'astrazione.

E' quindi necessario interpretare, rivelare e, quando necessario, codificare i messaggi o le informazioni nascosti all'interno di qualsiasi esperimento visuale.

Achrome (1957-1963),⁶ dell'artista milanese Piero Manzoni, è una serie di superfici bianche di gesso o di caolino, che *“non manifestano alcun significato, né esibiscono una manipolazione della materia.”*⁷

La tela, imbevuta di caolino liquido e di colla, è lasciata asciugare, affidando la trasformazione del materiale in opera ad un processo autosufficiente e spontaneo, attraverso cui la superficie è attraversata da righe verticali o orizzontali, o da griglie.⁸

Se Piero Manzoni scelse come materiali il caolino e il cotone per le



5.1 - *Achrome*, P. Manzoni (1959)

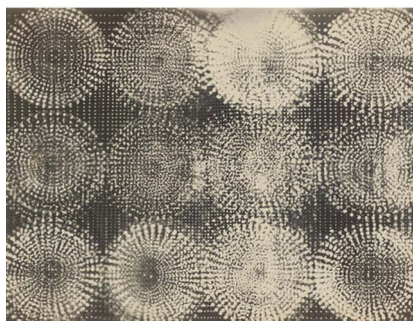
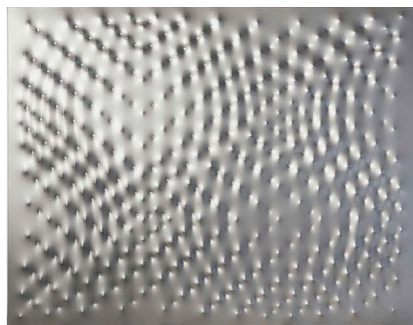
Caolino su tela grinzata

5.2 - *Achrome*, P. Manzoni (1962-63)

Polisterolo espanso e caolino

5.3 - *Achrome*, P. Manzoni (1962)

Ciottoli e caolino su tela



sue creazioni, artisti come Enrico Castellani e Agostino Bonalumi approfondirono le possibilità fornite dall'utilizzo di chiodi, centine e di sagome di legno e metallo e dall'inserimento di sagome di legno e di metallo inserite dietro la tela, per creare delle estroflessioni ritmiche, sensibilizzando le superfici attraverso un gioco di rilievi.⁹

Tra le opere degli artisti impegnati in questa ricerca, accomunati dalla stessa poetica, è interessante citare gli esperimenti ottici e meccanici di Otto Piene, i lavori di metallo lucidato di Heinz Mack, gli strappi su carta di Oskar Holwek, le ricerche geometrico-percettive di Dadamaino, i fotogrammi di Kilian Breier, le sfumature, le gradazioni e le tinte uniche dei *Monochrome* di Yves Klein, i pattern di Almir Mavigner, o le astrazioni geometriche di François Morellet.

Molto simile a tali esperimenti appare la "sensibilizzazione" di superfici, in origine lisce, rilasciate delle casseformi per le finiture a faccia vista del calcestruzzo, su cui vengono impresse *textures* e rilievi, oppure la fabbricazione digitale di prototipi derivanti dalla frestura di pezzi di materiale o dalla produzione di stampi per la realizzazione di superfici in gesso.

Il ciclo delle *plastiche* di Burri, caratterizzato dall'uso di un materiale del tutto inusuale e da una scelta di colori molto accesi, risale ai primi anni '60. L'artista approdava a immagini ottenute aggredendo la superficie e create dalla sua stessa distruzione e decomposizione attraverso il trattamento delle superfici con la fiamma ossidrica.

Egli applicò tale tecnica, da lui definita "combustione", impiegandola anche sul legno. Nelle sue opere la liquefazione del materiale assume delle forme consequenziali che, pur nascendo da un fenomeno oggettivo, si prestano a differenti interpretazioni.¹⁰

Le deformazioni della plastica rappresentano, infatti, il risultato dell'azione del calore sulla superficie. I tagli e le ferite ricordano le esperienze di Fontana, ma ne rappresentano la versione indotta da un fenomeno esterno e non derivante da un atto istintivo.

Alcuni esperimenti di carattere scientifico favoriscono la comprensione dei principi che differenziano il concetto di *texture* da quello di *pattern*.

La Cimatica,¹¹ ad esempio, designa una teoria, dovuta al medico svizzero Hans Jenny, che tenta di dimostrare l'effetto morfogenetico delle onde sonore, attraverso lo studio del suono visibile e delle vibrazioni: negli esperimenti cimatici la superficie di una piastra viene

fatta vibrare e le regioni di massimo e minimo spostamento sono rese visibili in un sottile strato di particelle, pasta o liquido posti sulla piastra. (figg.5.8a,b,c)

Il termine deriva dal greco *kymatika* (κυματικά) che significa "studio riguardante le onde" (da *kyma* (κύμα) che significa "onda, flutto").¹² Esperimenti di questo tipo erano già stati eseguiti in precedenza da Galileo Galilei, intorno al 1630, e da Robert Hooke, nel 1680, e furono successivamente perfezionati da Chladni.

Nel XVIII secolo, il musicista e fisico tedesco Ernst Chladni aveva osservato che le vibrazioni di una membrana, o di una lastra, possono essere visualizzati cospargendo della polvere sottile sulla superficie vibrante: per effetto della vibrazione la polvere si accumula progressivamente nei punti della superficie in cui la vibrazione è nulla. Quindi, a vibrazioni diverse corrispondono altrettanti pattern differenti: se, ad esempio, la vibrazione è stazionaria i punti formano un reticolo di linee, dette *linee nodali*.

Il reticolo di linee nodali (fig.5.9) è influenzato dalla forma geometrica della superficie e dal modo in cui la superficie è vincolata.¹³ Sollecitando in modi diversi la vibrazione della superficie si osservano, di volta in volta, solo alcuni degli infiniti reticoli nodali propri del corpo vibrante. Questi reticoli consentono di visualizzare la matrice geometrica che sottende alla forma.

Traendo ispirazione dalle esperienze di Chladni, nel 1967 Hans Jenny pubblicò il primo di due volumi intitolati *Kymatic*,¹⁴ nel quale lo studioso sostenne l'esistenza di un potere attraverso cui il suono è in grado di strutturare la materia.

Come i suoi predecessori, nei suoi esperimenti egli poneva su un piatto metallico, collegato ad un oscillatore che produceva un ampio spettro di frequenze, sabbia, polvere e fluidi.

La materia si riorganizzava generando diverse strutture, la cui geometria era legata alla frequenza della vibrazione emessa dall'oscillatore. Secondo Jenny queste strutture, che ricordano i *mandala* (cfr. cap. IV) ed altre forme ricorrenti in natura, sono in grado di manifestare visibilmente la forza invisibile del campo vibrazionale ed ogni forma conterrebbe le informazioni sulle vibrazioni che l'hanno generata.

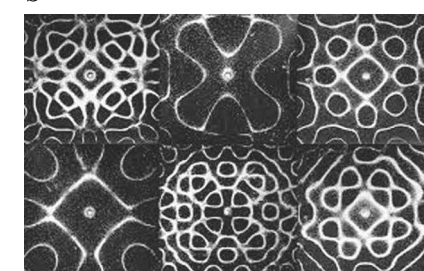
I reticoli nodali derivanti dagli studi di cimatica hanno ispirato la realizzazione di opere nel campo delle arti visive e della musica contemporanea. E' interessante sottolineare le sorprendenti analogie tra



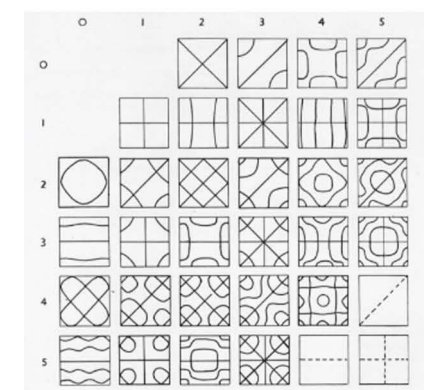
a



b



c



5.4 - *Superficie argento*, E.Castellani (2008)

5.5 - *Tirets 0 30 60 90*, F. Morellet, 1970

5.6 - *9 VIII 58*, Oskar Holwek (1958)

5.7 - *Untitled*, Otto Piene, 1959

5.8a,b,c- *Chladni plate* (XVII sec.)

5.9-E.Chladni, Tabella rappresentante esempi di linee nodali

gli esperimenti di sensibilizzazione sopra citati ed i pattern delle linee di curvatura che è possibile estrarre da una superficie. Tali pattern comunicano le informazioni relative alla natura geometrica delle superfici attraverso delle reti di curve, la cui distribuzione è legata alle tecniche di modellazione digitale impiegate per la genesi della forma. Per gestire queste informazioni è necessario utilizzare un codice che consenta la trasmissione del dato in maniera inequivocabile, pertanto, la conoscenza ed il controllo dei mezzi e dei sistemi grafici creati appositamente per tale scopo è fondamentale.

Un sistema visuale può diventare un mezzo utile, o alternativo, per la gestione di problemi di diversa natura: è importante sfruttare i diversi strumenti attraverso cui la tecnica ci consente di indagare e di visualizzare una stessa informazione, estraendo più significati da un sistema iniziale.

Nell'ambito della ricerca scientifica, l'uso alternativo degli strumenti di analisi, basati sulla comunicazione visiva di dati, può quindi rappresentare un approccio efficace per favorire processi innovativi.¹⁵ Pertanto, un pattern non rappresenta solo un semplice mezzo di comunicazione visuale, ma può essere considerato anche uno strumento utile per la gestione di un problema concreto.

Se è vero che, spesso, all'interno di una domanda è già contenuta la risposta, è nelle intime relazioni che strutturano la complessità stessa della forma che bisogna cercare la possibile soluzione per la sua ottimizzazione, necessaria per la gestione delle fasi di fabbricazione e costruzione.

5.1.2 Gli strumenti diagnostici: dal dato al *pattern*

Tra i *digital tools* (o strumenti digitali) ad oggi disponibili, i software forniscono strumenti diagnostici che consentono il rilevamento e la comunicazione visuale di dati derivanti da indagini specifiche eseguite su un dato oggetto o fenomeno. Tali dati traducono le informazioni relative

alla natura dell'oggetto, alle sue eventuali trasformazioni o ad una serie di fenomeni agenti su di esso, e sono solitamente espressi attraverso dei valori numerici.

Una scala cromatica ne visualizza la distribuzione, associando a cia-

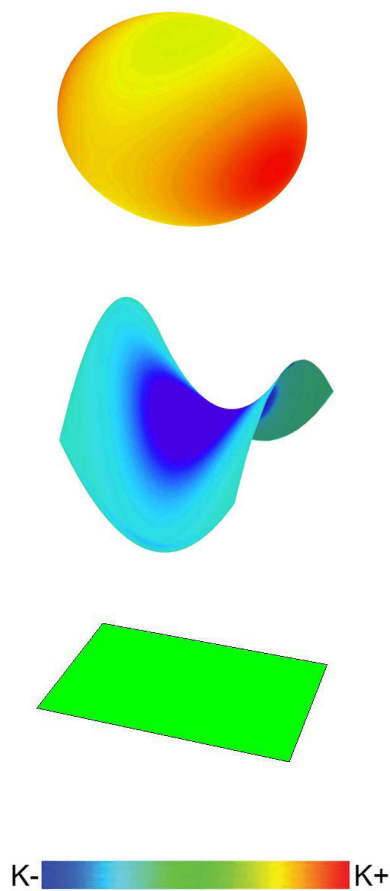
scuna delle diverse aree colorate un significato differente, legato ad uno specifico dato numerico. Tra le varie tecniche diagnostiche esistenti, a titolo esemplificativo, è possibile citare la termografia, che si basa sull'acquisizione di immagini nell'infrarosso (fig.5.10), il rilevamento degli stati tensionali, i rilevamenti della conducibilità elettrica, i diagrammi per la misurazione del pH, i diagrammi per la misurazione dell'azione e della distribuzione dei venti, etc. Nell'ambito dello studio delle superfici complesse, All'interno dei sistemi CAD sono stati sviluppati una serie di strumenti per l'analisi della qualità delle superfici complesse.¹⁶

Tra gli strumenti rivolti alla diagnostica delle superfici¹⁷ è possibile citare l'*Analisi curvatura*, l'*Analisi Zebra*, la *Mappa Ambiente*, utili per visualizzare la risposta della superficie in termini di comunicazione di contenuti legati esclusivamente alla sua natura o derivanti dall'interazione della stessa con l'ambiente circostante. In particolare, la tesi mira ad indagare le potenzialità dello strumento diagnostico *Analisi curvatura* (fig.5.11), il quale consente di visualizzare l'analisi della curvatura Gaussiana di una superficie: lo scopo è controllare la forma durante la fase progettuale, alla ricerca di soluzioni ottimali per la successiva fase di discretizzazione della superficie. Georg Friedrich Bernhard Riemann, ha introdotto il concetto di curvatura dello spazio e gli spazi di curvatura positiva e negativa: secondo questa teoria, una superficie piana occupa una posizione di mezzo tra le varie possibili.¹⁸

Riemann abbandona la tradizionale concezione euclidea dello spazio (strettamente geometrica) e la integra con una visione più analitica, basata sul calcolo.¹⁹ La sua teoria è di fondamentale importanza per il concetto di generalizzazione del piano e dello spazio cartesiano. Riemann utilizza come modello una superficie curva, da cui nasce l'esigenza di introdurre un valore di curvatura dello spazio. Secondo tale valore si possono distinguere tre tipi di curvature costanti:²⁰

- curvatura negativa (geometria iperbolica);
- curvatura nulla (geometria Euclidea);
- curvatura positiva (geometria ellittica).

Il caso di cui si occupa principalmente Riemann è quello della geometria ellittica, ed è fondato essenzialmente sull'ipotesi che la retta sia chiusa e finita, il piano sia costituito da una superficie chiusa, e per comodità si potrebbe pensare ad una superficie sferica, i punti



5.10 - Esempio di superficie a curvatura gaussiana positiva (ellissoide), negativa (paraboloide iperbolico) e nulla (superficie piana). Nella concezione spaziale di Riemann, le geometrie primitive e le forme complesse rappresentano diversi steps di complessità formale, secondo cui le prime possono essere trasformate nelle seconde, e viceversa.

sono solo i punti distribuiti su di essa e le rette per due punti sono i cerchi massimi passanti per essi: è evidente che, secondo questo modello, non esistono rette parallele.²¹

Da tale teoria deriva che la geometria euclidea rappresenta quindi solo un particolare tipo di geometria: nella concezione spaziale di Riemann, le geometrie primitive e le forme complesse rappresentano dunque diversi steps individuabili sulla scala della complessità formale, secondo cui le prime possono essere trasformate nelle seconde e viceversa.

L'attributo "gaussiana", accostato al sostantivo curvatura, deriva dal nome del matematico tedesco Carl Friedrich Gauss, i cui studi hanno contribuito, in maniera sostanziale, allo sviluppo di importanti teorie nel campo all'analisi matematica, della Geometria Differenziale, della Geodesia, del Magnetismo e dell'Ottica.²²

Ed è proprio dalle ricerche condotte nell'ambito della Geodesia nasce il suo interesse per la Geometria Differenziale, grazie alla quale Gauss sviluppa il cosiddetto *Theorema egregium* (1827), pubblicato nelle *Disquisitiones generales circa superficies curvas*,²³ enunciato nel seguente modo:

"Si superficies curva in quacumque aliam superficiem explicatur, mensura curvaturae in singulis punctis invariata manet."

La denominazione *Theorema egregium* (o Teorema egregio) deriva dall'importanza del risultato: la curvatura gaussiana è "intrinseca" alla superficie ed è indipendente dallo spazio-ambiente in cui è immersa, nonostante sia definita come prodotto delle curvature principali (il cui valore dipende, invece, da come la superficie è immersa nello spazio che la contiene).

Questo risultato, unitamente al fatto che le superfici con differente curvatura gaussiana non possono essere fra loro isometriche, o sovrapponibili, è estremamente utile per la ricerca di metodi che favoriscono la discretizzazione di una superficie complessa mediante la computazione di modelli semi-discreti o di pannelli a singola o doppia curvatura. Ad esempio, una sfera (che ha curvatura gaussiana costante e positiva in ogni punto) non può essere isometrica al piano (che ha curvatura gaussiana nulla): è questo il motivo per cui, ad esempio, i planisferi presentano sempre delle distorsioni.

Queste osservazioni, oltre a dimostrare la tendenza progettuale di questa grandezza matematico-geometrica, rappresentano una delle

principali fonti di ispirazione per gli esperimenti condotti e mostrati all'interno del nono capitolo di questa tesi.

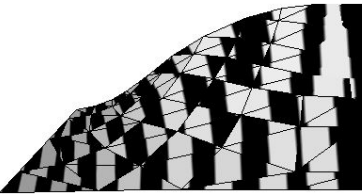
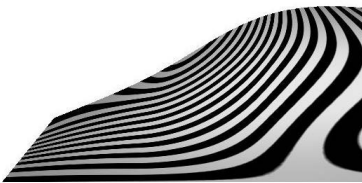
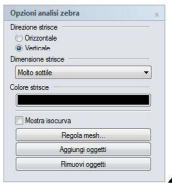
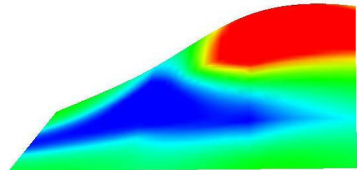
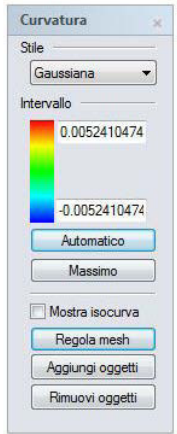
Più intuitivamente, questo strumento diagnostico consente di visualizzare le informazioni legate alla curvatura di una superficie. L'analisi delle curvature Gaussiana e Mediana è importante per visualizzare in maniera diretta l'esistenza di anomalie: i cambiamenti bruschi della curvatura, quali rilievi, dentellature, o increspature devono essere rilevati e corretti per ottimizzare le successive operazioni da compiere sulla superficie. Questo strumento info-grafico associa il colore rosso ad un valore positivo della curvatura Gaussiana, il colore verde ad un valore nullo ed il colore blu ad un valore negativo. I punti sulla superficie con un valore numerico di curvatura al di sotto dell'estremo rosso dell'intervallo saranno rossi, mentre i punti con un valore di curvatura al di sotto dell'estremo blu dell'intervallo saranno blu: questo significa che il software stabilisce, come estremi della scala cromatica, dei valori numerici arbitrari, ed è quindi possibile inserire manualmente un range all'interno del quale valutare la variazione di curvatura della superficie. (fig.5.11a) Una superficie che presenta valori positivi di curvatura Gaussiana corrisponde ad una superficie convessa, o *sinclastica* (cioè curvata dalla stessa parte in tutte le direzioni: un esempio sono la sfera, o l'ellissoide), mentre se tali valori sono negativi la superficie è concava, o *anticlastica*.²⁴ (fig.5.10)

Un valore di curvatura gaussiana pari a zero significa che la superficie è piana in almeno una delle due direzioni principali (un esempio è il cilindro, o le superfici sviluppabili in genere). Il comando *Analisi Curvatura* genera una mesh invisibile dalle superfici oggetto di analisi, necessaria per la distribuzione dei differenti colori.

Per analizzare in modo appropriato una superficie NURBS è necessario che tale mesh sia opportunamente dettagliata: pertanto, lo strumento consente di scegliere il grado di tassellatura più appropriato. Anche lo strumento *Analisi Zebra* (disponibile in Rhino - 5.11b) è particolarmente utile per il controllo e la verifica delle superfici architettoniche.

Tale strumento si basa sul concetto di isòfote che, come il termine stesso indica, sono curve a uguale illuminazione. Queste curve sono definite come *"il luogo dei punti in cui una luce direzionale forma lo stesso angolo con la normale locale alla superficie."*²⁵

Un'altra tipologia di curve interessanti è quella delle curve di rifles-



5.11a - Analisi curvatura
5.11b - Analisi zebra di una superficie nurbs e della corrispondente mesh triangolare.

sione: esse sono generate in funzione della capacità riflettente di una superficie, che si ipotizza renderizzata con un materiale perfettamente lucido e capace di riflettere l'ambiente circostante colorato a strisce bianche e nere. A differenza delle curve isòfote, le curve di riflessione cambiano rispetto alla posizione del punto di vista.²⁶ Le curve isòfote possono essere visualizzate attraverso l'alternarsi di una serie di strisce bianche e nere: da ciò deriva il nome *zebra*.²⁷

Le curve zebra (strumento *Analisi Zebra*) sono molto utili per visualizzare la continuità delle superfici. Come dimostrato per il caso studio trattato all'interno del settimo capitolo, il problema della discretizzazione di superfici free form è, talvolta, strettamente legato alla qualità riflettente delle superfici: una superficie tassellata non permette di ottenere curve di riflessione continue, e questo spesso collide con la volontà estetica ed espressiva dell'architetto o del designer.

5.2 Cenni di Geometria Differenziale: la curvatura delle superfici:

La natura di una superficie di forma complessa è strettamente legata alle caratteristiche geometriche dell'insieme di punti o di curve che ne determinano la struttura. Le superfici *free form* sfuggono alle rigide regole su cui si basa la genesi delle superfici definite *analitiche* o *specializzate*²⁸ e non possono quindi essere semplicemente definite come luogo geometrico. Con il termine “analitiche” si intendono tutte le superfici “note”, tra cui piani, cilindri, coni, paraboloidi iperbolici, etc. mentre con il termine free form si intendono tutte le altre.²⁹

Pertanto, è necessario indagare i metodi di discretizzazione capaci di assecondare la natura delle forme libere al fine di gestirne in maniera consapevole la progettazione e la realizzazione. L'obiettivo di questo capitolo è richiamare e dimostrare i contenuti geometrico-matematici necessari per la comprensione delle applicazioni trattate e sperimentate nei capitoli successivi.

Nell'ambito di un approccio alla ricerca che intende contribuire al processo di rinnovamento della Geometria Descrittiva, è pertanto utile richiamare i “*metodi applicati alla costruzione e allo studio di forme che ricorrono nel progetto dell'architettura e del prodotto industriale.*”³⁰

Ciò consente di dimostrare e di potenziare il rapporto tra le speculazioni geometriche e il progetto. Queste riflessioni hanno consentito notevoli avanzamenti nei campi applicativi della Geometria Descrittiva e della Geometria Differenziale, tra cui quello dell'*Architectural Geometry*. La natura geometrica delle curve è il primo contenuto teorico che è necessario indagare per comprendere a pieno l'identità di una superficie: esse rappresentano, infatti, gli elementi che ne definiscono la struttura di base. Pertanto, tutte le operazioni e le speculazioni che è possibile applicare su una superficie sono influenzate dalle proprietà dei suoi punti e delle sue curve. Una curva può essere rappresentata in forma grafica o in forma analitica attraverso tre differenti modalità: forma implicita, esplicita o parametrica.³¹ I sistemi CAD si avvalgono della rappresentazione parametrica perché capace di descrivere le variazioni di un qualsiasi ente in funzione di un unico valore assunto volta per volta dall'unico parametro in gioco.

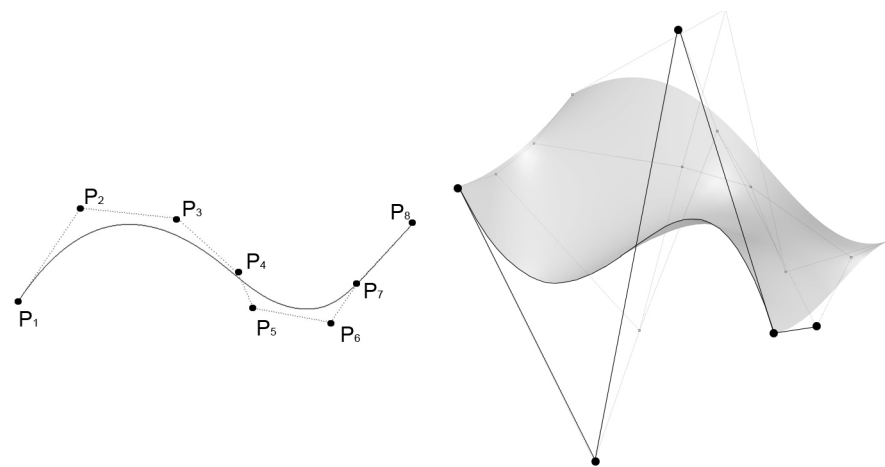
Le geometrie NURBS, risalenti agli anni '50, grazie alla flessibilità che le contraddistingue, rappresentano oggi degli strumenti ampiamente utilizzati.³² Le curve e le superfici, attraverso questo tipo di rappresentazione, vengono quindi definite come “interpolazione” rispettivamente di punti e/o di curve:³³ pertanto, traslando o ruotando tali enti, è possibile modificare le curve o le superfici di partenza. (fig.5.12,13) Una superficie S è costituita da un insieme di punti tale che:

$$S = S(u,v)$$

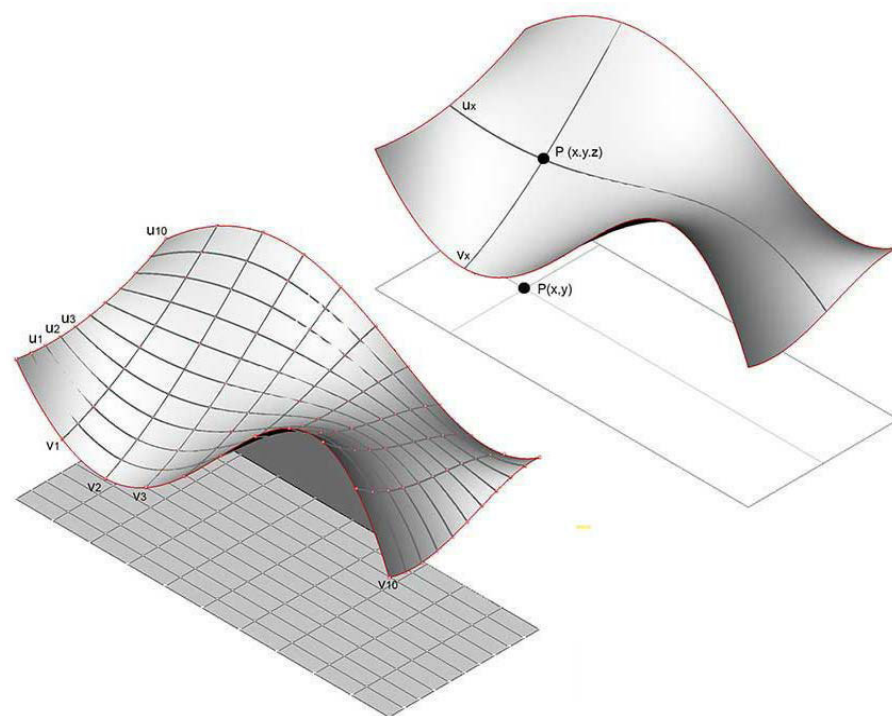
in cui u e v sono due parametri.

Variando questi due parametri all'interno di un intervallo di definizione è possibile individuare tutti i punti di una superficie. In una superficie parametrica di tipo NURBS, definita quindi da una rete di curve NURBS, i due parametri, u e v, generano un dominio rettangolare piano (2D), rappresentato dall'individuazione di due direzioni: a ciascuna coppia di coordinate u e v corrisponde un punto nello spazio, avente una specifica quota ed appartenente ad una superficie curva. L'espressione parametrica completa di una superficie è:

$$s(u, v) = [x(u, v), y(u, v), z(u, v)]$$



I parametri u e v , definiti in due intervalli distinti, mappano una regione bidimensionale.³⁴
Inoltre, ciascuna curva è definita in funzione di uno dei due parametri, ed è quindi nota con il nome di curva iso-parametrica.
Pertanto, la curva definita in funzione del parametro u , si muove nello spazio seguendo la traiettoria definita dalla variazione del parametro v . (fig.5.14)



5.12,13 - Curve e superfici, attraverso la rappresentazione parametrica sono definite come interpolazione di punti e curve.
5.14- I parametri u e v mappano una regione bidimensionale. Le curve definite ciascuna in funzione di uno dei due parametri è detta curva iso-parametrica.

L'analisi e la gestione della natura e della qualità delle superfici, soprattutto se di tipo complesso, richiamano i principi della Geometria Differenziale, tra cui proprio le definizioni di curvatura di una curva e di curvatura Gaussiana di una superficie, la quale rappresenta il dato più importante per tentare di dimostrare la tesi a cui questa ricerca è rivolta.

La Geometria Differenziale “*studia gli oggetti geometrici utilizzando gli strumenti del calcolo differenziale e integrale, ed è possibile affermare che i suoi concetti distintivi sono quelli che abbracciano la natura geometrica della derivata seconda che descrive i molteplici aspetti della curvatura.*”³⁵ Inoltre, “*la classificazione differenziale considera le superfici come classi bidimensionali dei punti nello spazio soddisfano determinate condizioni locali. In questo caso le superfici si possono classificare in funzione della curvatura gaussiana, che può assumere valori negativi, nulli o positivi, senza escludere la compresenza, sulla medesima superficie, di punti con valori di curvatura diversi.*”³⁶

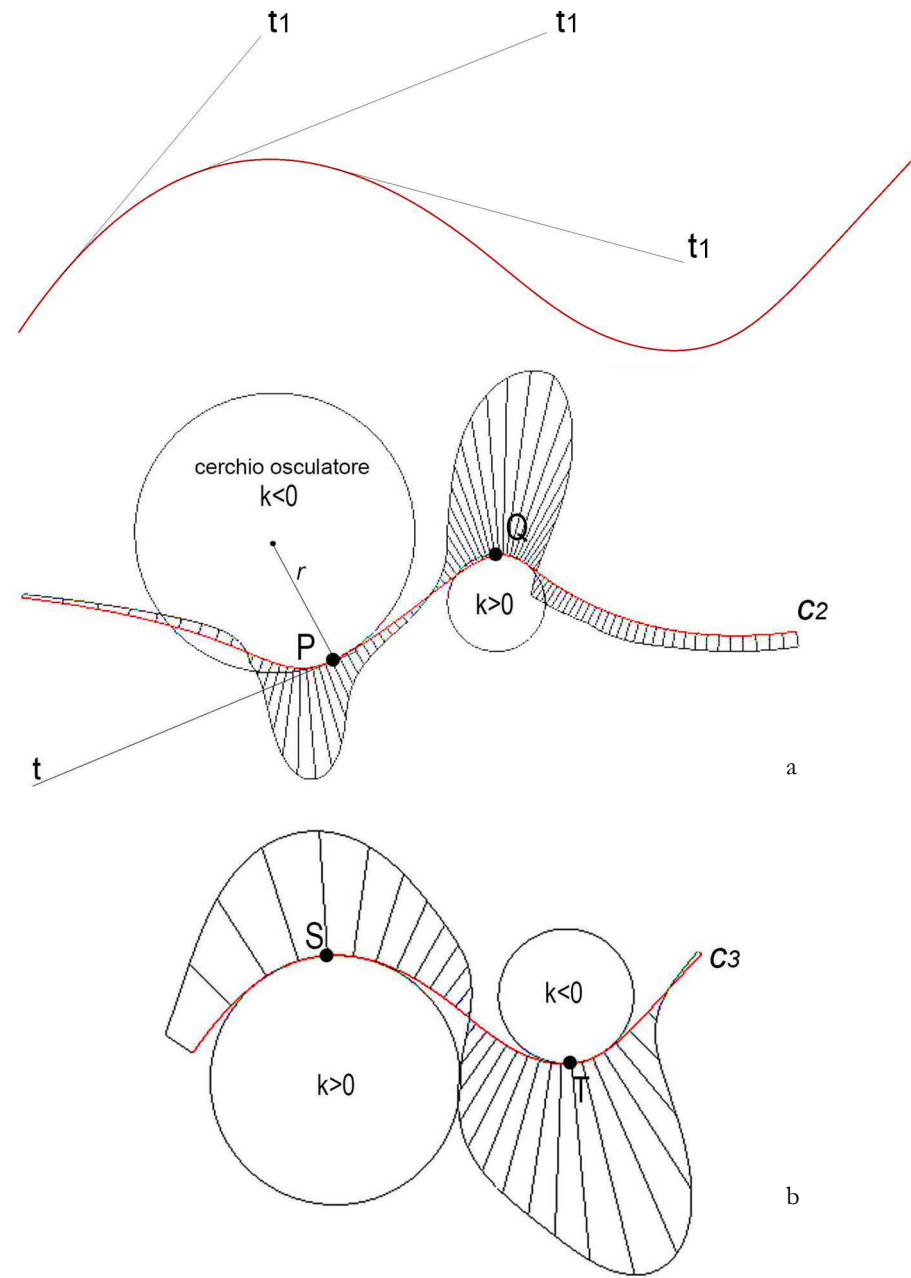
Talvolta accade di avere a che fare con curve di cui si ignora la natura: tali curve sono denominate dalla geometria classica come *curve grafiche* o *linee grafiche*, cioè traiettorie tracciate arbitrariamente.³⁷
E' il caso delle curve coinvolte nella genesi di superfici di tipo *free form*.

E' noto che, data una curva, di ogni suo punto è possibile definire la tangente, la curvatura e la torsione (fig. 5.15,16a,b).³⁸
Tangenza, curvatura e torsione descrivono la continuità di una curva: tali condizioni vengono estese alla definizione di continuità geometrica G per una superficie.
Una linea è tanto più curva quanto più rapidamente si allontana dalla direzione rettilinea, cioè dalla retta tangente.³⁹

La curvatura k di una curva in un punto P è l'inverso del raggio della circonferenza passante per tre punti, infinitamente vicini, della stessa:

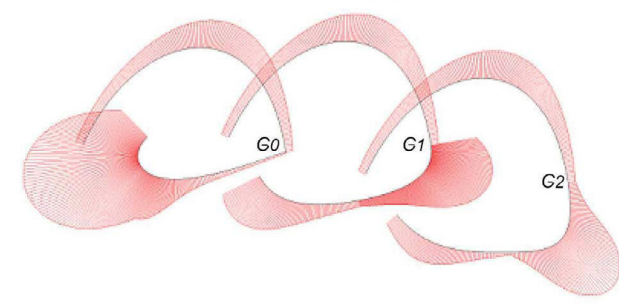
$$k = 1/R$$

Il punto P è intermedio tra i tre punti individuati: tale circonferenza si chiama cerchio osculatore, ed il suo raggio varia lungo la curva.⁴⁰
E' chiaro che per i punti di una retta il cerchio osculatore sarà infinito: i tre punti per cui passa tale cerchio sono allineati, quindi k è uguale a zero.



5.15 - Tangenti di una curva.
5.16a,b - Rappresentazione della curvatura di una curva: grafici di curvatura e cerchi osculatori)

Date due curve consecutive, consideriamo un punto comune ad entrambe (fig.5.17):
se le due tangenti alle curve nel punto considerato sono allineate o sovrapposte, abbiamo una *continuità di ordine 1* o *continuità in tangenza* – *G1*; se i cerchi osculatori nel punto considerato coincidono, abbiamo una *continuità di ordine 2* o *continuità in curvatura* – *G2*.⁴¹



5.17 - I grafici di curvatura mostrano continuità G0, G1 e G2.

Esprimendo lo stesso principio dal punto di vista matematico, e traducendo, quindi, il concetto di tangenza con la derivata prima di una curva, è possibile parlare di continuità parametrica: se questa condizione è soddisfatta, allora sarà soddisfatta anche la corrispondente continuità di tipo geometrico.⁴²

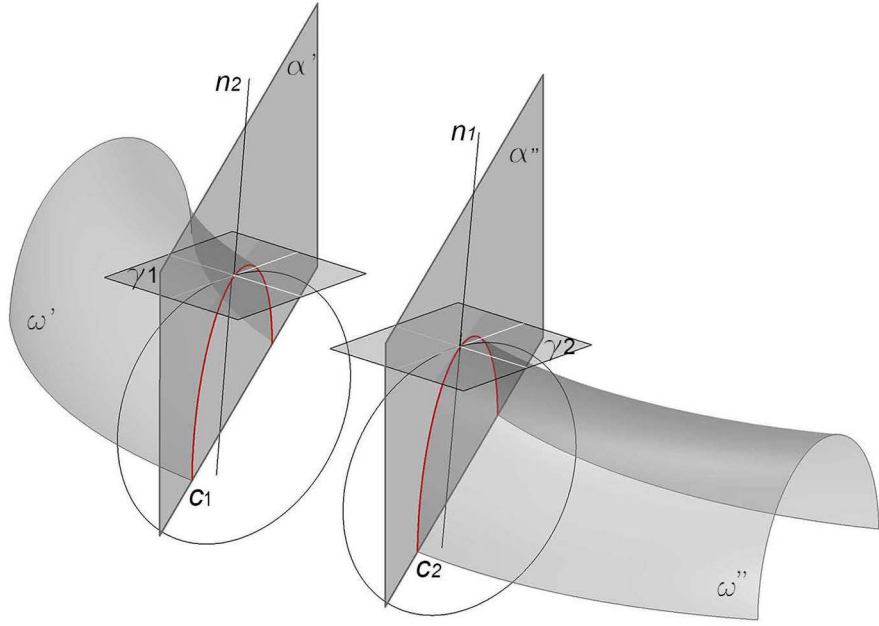
Il *grafico di curvatura* (fig.5.16a,b) è uno strumento utile per valutare la qualità delle curve, visualizzando gli eventuali punti di flesso, e quindi i cambi di concavità, e la continuità tra curve adiacenti, verificando la presenza di eventuali salti.⁴³

Ai fini di una corretta genesi formale, è importante sottolineare che tentare di descrivere una forma, caratterizzata dalla distribuzione di aree di natura morfologicamente diversa, con un'unica superficie NURBS, talvolta non genera risultati soddisfacenti: quindi, in alcuni casi, è preferibile optare per l'unione di più superfici, le quali potranno essere di tipo procedurale, capaci di approssimare la complessità originaria, oppure diverse patch di tipo *free form*.⁴⁴

Considerando gli stessi principi di continuità validi per una curva, si ha che, date due superfici consecutive, per ogni curva di bordo in comune si ha una continuità di tipo C1 se la giacitura dei piani tangenti alle due superfici coincide;

si ha una continuità di tipo C2, se si verifica la coincidenza tra i due cerchi osculatori contenuti sul piano perpendicolare ai due piani tangenti, individuati e coincidenti in quel punto, e appartenenti alle due superfici adiacenti.⁴⁵ (fig.5.18) A tale proposito, completiamo ricordando che, per il teorema di Dupin, *se due superfici sono continue in curvatura rispetto solo a tre piani, allora sono continue anche rispetto a tutti gli altri piani*.⁴⁶

Ciò è dovuto al fatto che lo spazio ha tre dimensioni, quindi la superficie non può curvarsi in più di tre direzioni.



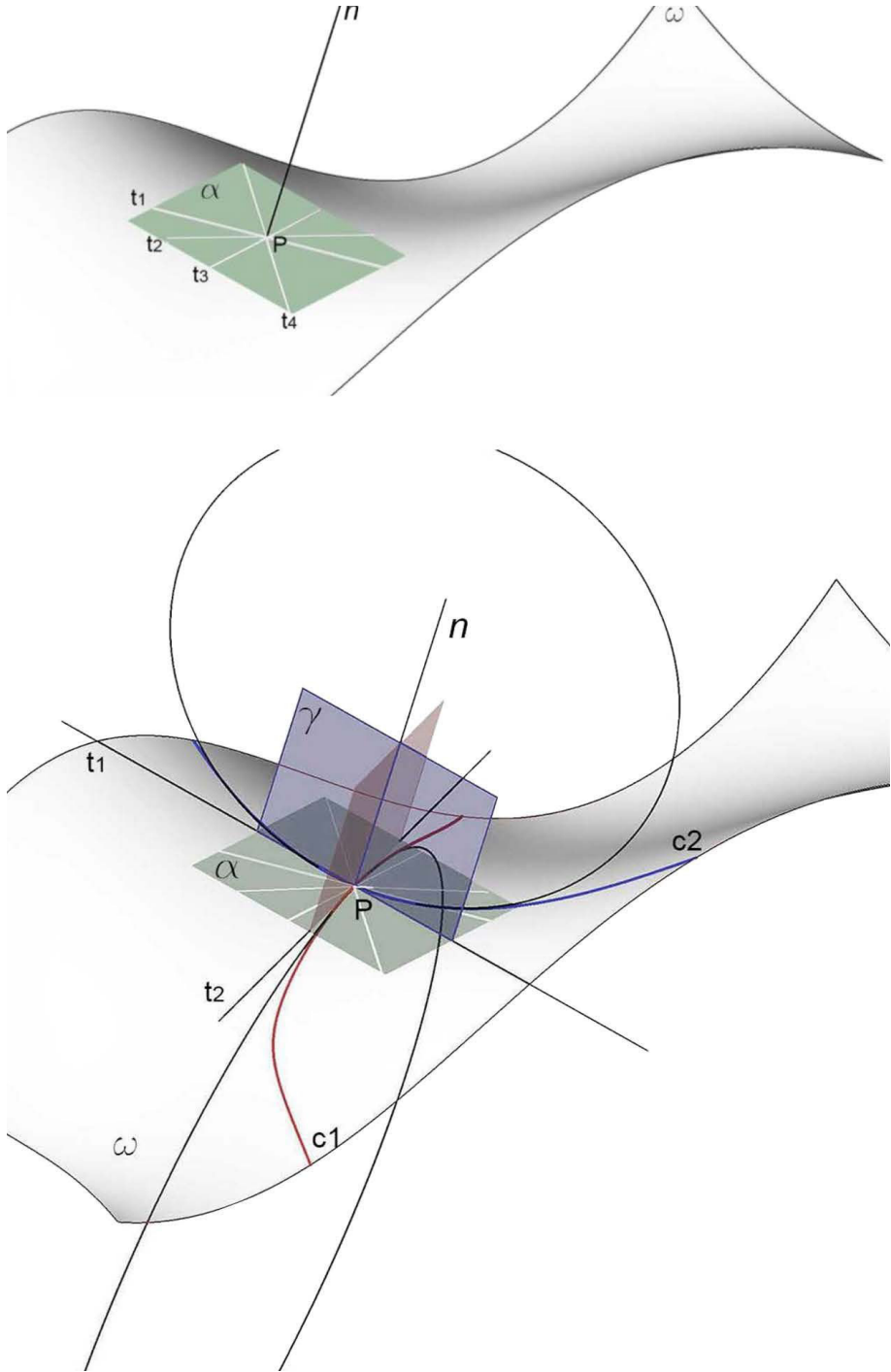
5.18 - Continuità tra superfici: le normali, i cerchi osculatori e i piani tangenti coincidono.

Uno degli scopi della tesi è rivelare la natura delle superfici complesse attraverso i possibili *pattern* di graficizzazione della Curvatura Gaussiana.

Data una superficie ω , si consideri che per ogni punto ad essa appartenente passa un insieme infinito di curve: ciascuna di esse avrà una tangente ed un proprio cerchio osculatore in quel punto, differente da quello delle altre curve. Dato un punto P appartenente ad ω è possibile individuare un piano α , tangente ad ω in P e la normale n .⁴⁷ (fig.5.19)

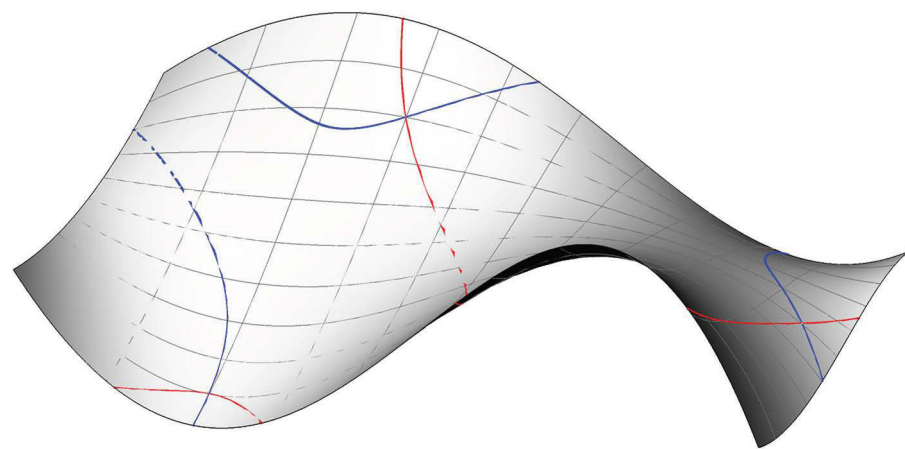
L'intersezione tra il fascio di piani passanti per n ed il piano tangente α è rappresentata dal fascio di rette tangenti alla superficie e ad esso appartenenti. Tra tutti i piani perpendicolari ad n ne esistono solo due, γ e β a loro volta mutuamente perpendicolari, che tagliano la superficie individuando due curve, $c1$ e $c2$, o sezioni normali, i cui raggi di curvatura in quel punto, cioè i raggi dei relativi cerchi osculatori, assumono valore massimo e valore minimo (fig.5.20)

Tali curvature ($k = 1/R$, con R che assume il valore più grande e più piccolo possibili per la superficie in quel punto) sono definite rispet-



5.19 - Individuazione del piano tangente ad una superficie in un punto P ad essa appartenente.

5.20 - Rappresentazione dei cerchi osculatori che definiscono la curvatura di una superficie in un punto P

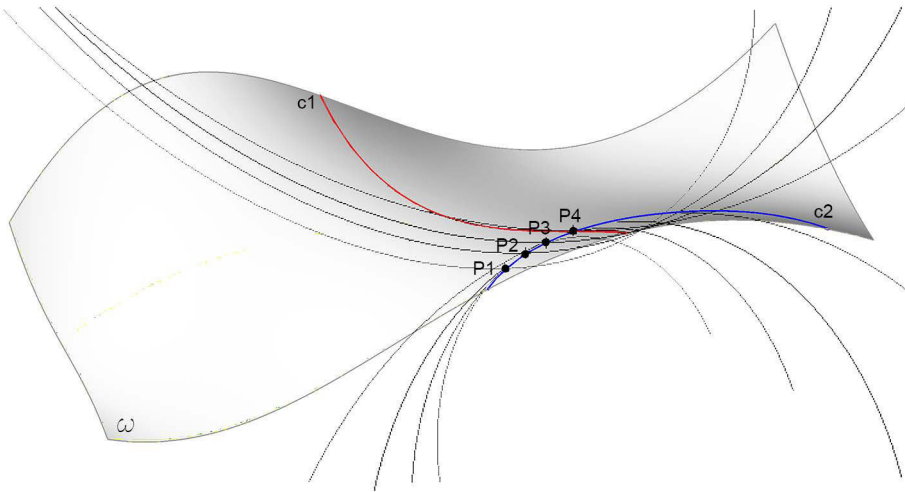


5.21- Linee di curvatura principale individuate per due punti appartenenti alla superficie.

tivamente curvatura minima e massima, o curvature principali della superficie: le due curve vengono, quindi, definite linee di curvatura principale, ed in particolare linee di curvatura massima (in rosso) e linee di curvatura minima (in blu). (figg.5.20, 5.21)

Il prodotto delle due curvature principali definisce la curvatura Gaussiana K della superficie in quel punto.⁴⁸

$$K = k_1 * k_2 = 1/r_{\min} * 1/r_{\max}$$



5.22 - Dato un punto P_0 , e individuate le direzioni principali per tale punto, per tracciare una linea di curvatura è necessario, punto dopo punto, seguire le direzioni principali volta per volta individuate, le quali coincidono con le direzioni delle successive tangenti ai cerchi osculatori

Per rappresentare una linea di curvatura principale è necessario individuare una delle due tangenti principali in un dato punto P_n della superficie e tracciare la curva seguendo la nuova direzione principale, volta per volta, individuata dalla tangente successiva. (fig. 5.22)

Tuttavia, il metodo fornisce risultati approssimativi.⁴⁹

Attualmente, è possibile avvalersi dello strumento *et_Extract principal curvature lines*, fornito dal *plug-in Evolute Tools Pro* di *Rhino*, per estrarre le linee di curvatura principale da una superficie: ciò rende possibile la verifica o la manipolazione di una superficie già durante la fase embrionale del progetto, in maniera facilmente comprensibile e gestibile per un architetto. (fig.5.21)

Questo favorisce lo sviluppo di un approccio alla progettazione sicuramente più ragionato e consapevole, senza limitarne la libertà formale o espressiva. Un approccio di questo tipo, discusso e mostrato all'interno del settimo capitolo, è stato utilizzato dai *geometry experts* per ottimizzare la forma della superficie curva delle facciate degli *Eiffel Tower Pavilions*.

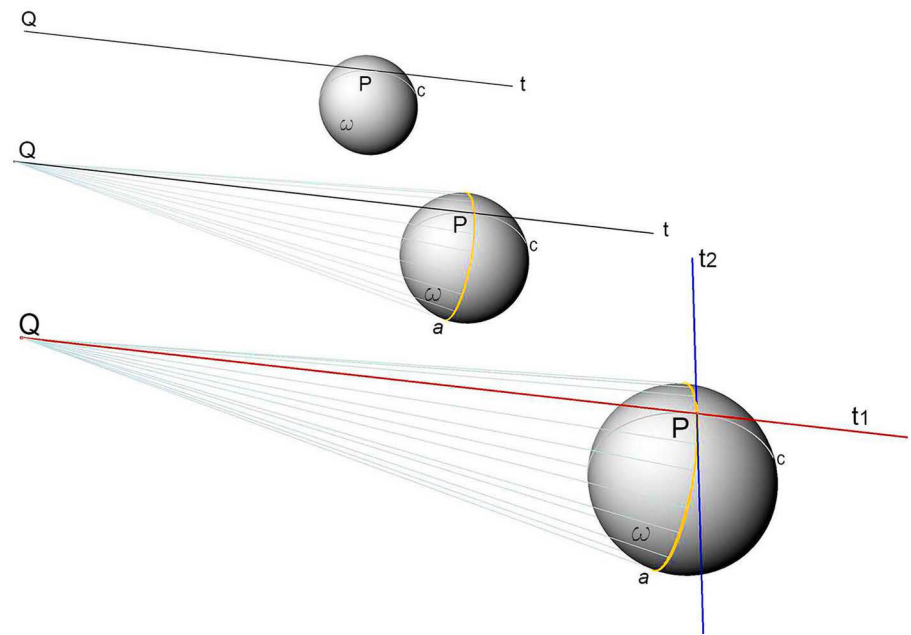
La curvatura mediana K_m rappresenta la media calcolata tra le due curvature principali.⁵⁰

$$K_m = \frac{k_1 * k_2}{2}$$

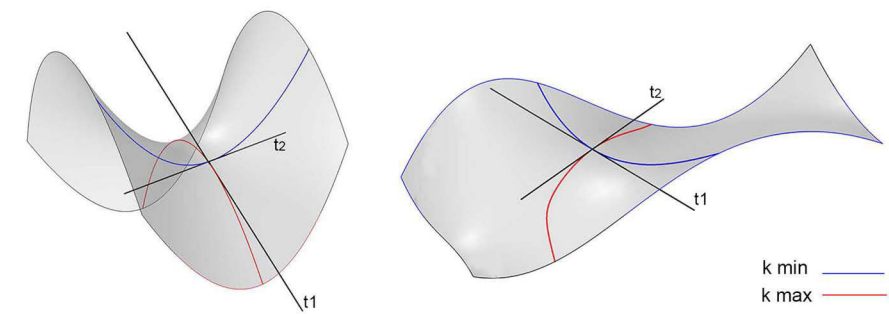
La rete di curve individuate dalle linee di curvatura principale, a cui appartengono anche le generatrici e le direttrici delle superfici procedurali o analitiche, viene anche definita rete di curve coniugate.

Queste si definiscono come coppie di famiglie di linee di una superficie, tali che per ogni punto della superficie passino una sola curva della prima famiglia e una sola curva della seconda in maniera tale che le due direzioni tangenti alle due curve siano coniugate.⁵¹

Per comprenderne meglio il significato del termine coniugate, è utile richiamare il concetto di tangenti coniugate. Si consideri un punto P , appartenente ad una superficie ω e una tangente t alla superficie uscente da esso (fig.5.23). Si stacchi su t un punto Q e tracciamo su ω il contorno apparente c proiettando la superficie dal punto Q , in modo da definire un cono proiettivo di cui t costituisce una delle generatrici: la direzione t_2 tangente al contorno apparente c nel punto P si dice coniugata alla direzione $t \equiv t_1$.



5.22 - Individuazione di due direzioni coniugate.



5.23 - Le generatrici e le direttrici di una superficie rappresentano un sistema di curve coniugate.
5.24 - La rete delle linee di curvatura principale è composta da due famiglie di curve coniugate.

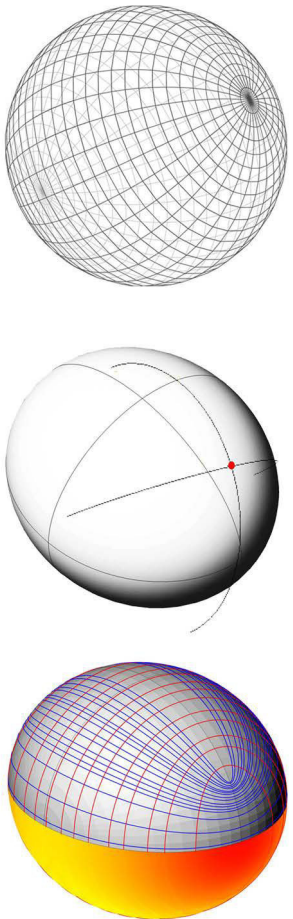
Eseguendo più volte tale opeprocedura è possibile estrapolare una rete di curve coniugate dalla superficie.⁵² I matematici che hanno indagato questi principi hanno indicato e dimostrato diverse procedure per estrarre da una superficie delle reti composte da coppie di famiglie di curve coniugate.⁵³ Oltre a consentire l'estrazione delle linee di curvatura principale, il *plug-in Evolute Tools Pro (Rhino)* consente, attraverso l'uso del comando *et_Extract conjugate lines* di estrarre automaticamente una rete di curve coniugate computata a partire da un direzione assegnata. Per ottimizzare i processi di discretizzazione di una superficie complessa è necessario che la rete composta dalle linee di curvatura sia il più possibile regolare: è intuitivo che, in fase progettuale sarà necessario tendere il più possibile a tale condizione di regolarità.

A tal proposito, è importante definire i *punti ombelicali*, anche *punti*

di *singularità*, per le conseguenze che questi determinano in fase di tassellazione piana o curva delle superfici. Un sottoinsieme di una superficie che contiene solo punti ombelicali, si chiama *zona ombelicale*. In corrispondenza di un punto non ombelicale, è possibile distinguere due vettori ortogonali tangenti alle linee di curvatura che si intersecano nel punto stesso. I punti ombelicali giocano un ruolo significativo nella qualità delle reti composte dalle linee di curvatura principale.⁵⁴ Dato un punto P appartenente ad una superficie, se:

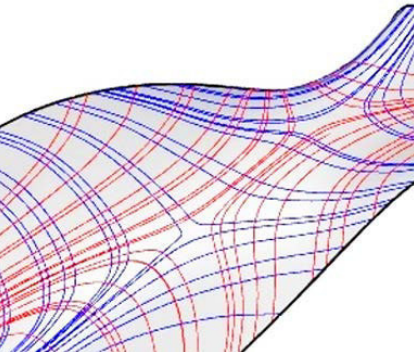
$$k_1 = k_2$$

se, cioè le due curvatures principali coincidono, allora P è un punto ombelicale. (k_1 e k_2 sono le due curvatures principali). Un punto è definito ombelicale, o di *singularità*, quando le due direzioni principali coincidono o non sono definite in modo univoco. La sfera, ad esempio, è l'unica superficie a curvatura costante per cui ogni punto è un punto ombelicale: infatti, considerato un punto ad essa appartenente, essendo il raggio costante, tutti i cerchi osculatori, e quindi le rispettive curvatures, saranno uguali (fig.5.26). Pertanto, in Geometria Differenziale un punto ombelicale è anche detto punto sferico: in tali punti la curvatura della superficie è uguale in tutte le direzioni e quindi le curvatures principali coincidono. Generalmente, i punti ombelicali si manifestano come punti isolati posti in una regione ellittica della superficie, in cui la curvatura Gaussiana è positiva. Se si considera un ellissoide, superficie analitica a curvatura gaussiana positiva, ci saranno almeno quattro punti ombelicali.⁵⁵ (fig.5.27) I punti ombelicali possono anche essere individuati e classificati in base al pattern che individua le direzioni principali in quel punto. I tre pattern possibili sono: *star* (o stella) (fig.5.29c), *lemon* (o limone) (fig.5.29a), e *lemonstar* (o *monstar*, configurazione che nasce come combinazione delle altre due)⁵⁶ (fig. 5.29b). I punti ombelicali ellittici e parabolici si manifestano sempre attraverso il pattern a stella, mentre quelli iperbolici possono manifestarsi come stelle, limoni, o *monstar*. Questa classificazione è dovuta a Darboux, mentre i nomi attribuiti alle configurazioni dei pattern sono stati stabiliti da Hannay.⁵⁷ Ai fini della classificazione delle superfici, è importante definire il segno della curvatura gaussiana. Si consideri un vettore normale ad una superficie in punto:

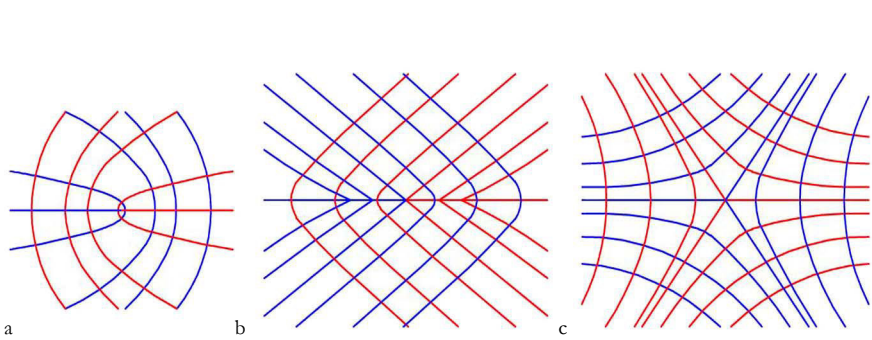


K- K+

5.25 - La sfera è l'unica superficie a curvatura costante per cui ogni punto è un punto ombelicale
5.26 - 5.27 - In un ellissoide, superficie a curvatura gaussiana positiva, esistono almeno quattro punti ombelicali e simmetrici



5.28 - Punti di singolarità di una superficie.
5.29 a,b,c - Tipi di punti di singolarità:
a. *Lemon*, b. *Lemonstar*, c. *Star*



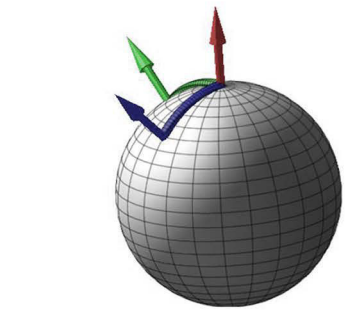
se la superficie ha curvatura gaussiana positiva, i vettori distribuiti lungo le due curve punteranno verso una direzione differente rispetto a quella del vettore iniziale; (fig.5.30)

se la superficie ha curvatura gaussiana negativa, i vettori distribuiti lungo la curva blu punteranno in direzione del vettore iniziale, mentre i vettori distribuiti lungo la curva rossa punteranno verso una direzione differente rispetto a quella del vettore iniziale; (fig.5.31)

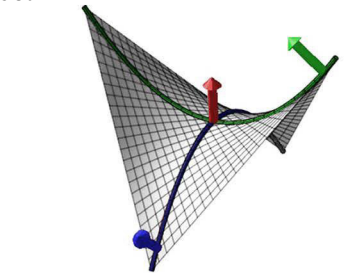
se la superficie ha curvatura gaussiana nulla, l'orientamento dei vettori lungo la curva blu non cambia, mentre i vettori distribuiti lungo la curva rossa punteranno verso una direzione differente rispetto a quella del vettore iniziale.⁵⁸ (fig.5.32)

Il segno della curvatura gaussiana K di una superficie è positivo o negativo in base all'esistenza e al segno di entrambe le curvature principali, quindi in base alla posizione dei due cerchi osculatori (fig.5.33): se K è positiva, il punto si definisce ellittico, e la superficie, nell'intorno del punto, presenta un andamento convesso: in tale punto il piano tangente la superficie non interseca la superficie stessa. Le curvature principali possono essere entrambe positive o entrambe negative, il loro prodotto sarà infatti sempre positivo.

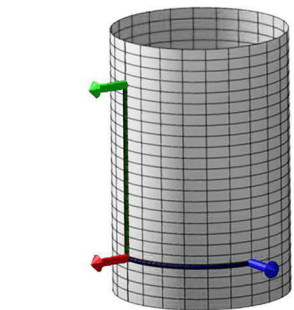
se K è negativa, il punto si definisce iperbolico, e la superficie, nell'intorno del punto, presenta un andamento né concavo, né convesso: in tale punto il piano tangente la superficie interseca la superficie stessa. In questo caso le curvature principali sono opposte, il loro prodotto sarà infatti sempre negativo. Alcune superfici a curvatura gaussiana negativa sono anche superfici rigate, determinate cioè da una schiera di generatrici rettilinee, ma non sono sviluppabili; se, infine, K è uguale a zero, il punto si definisce parabolico, e la superficie è rappresentata da un piano, oppure, è una superficie rigata e sviluppabile.⁵⁹



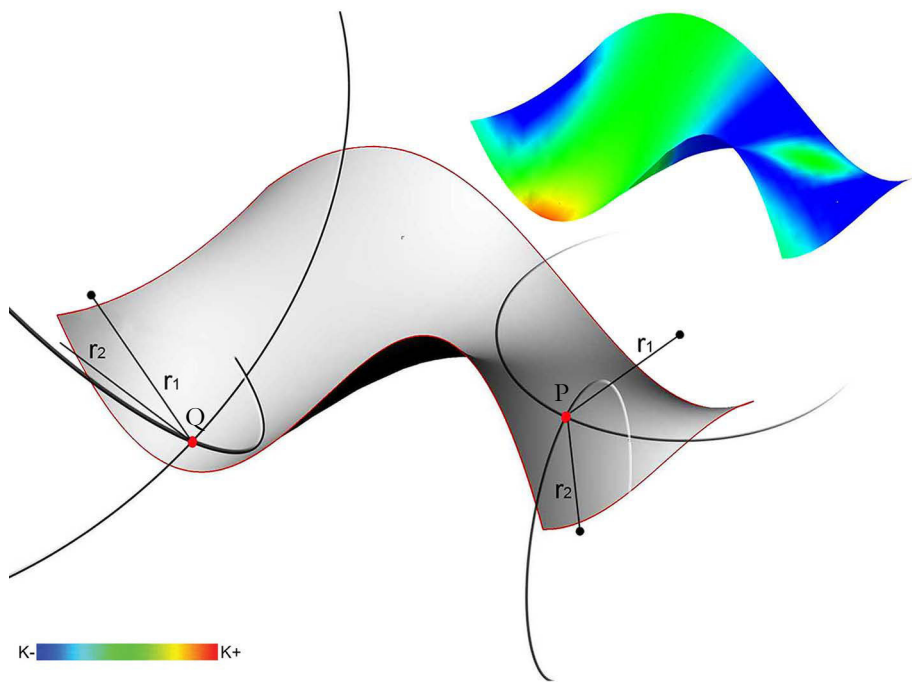
5.30



5.31



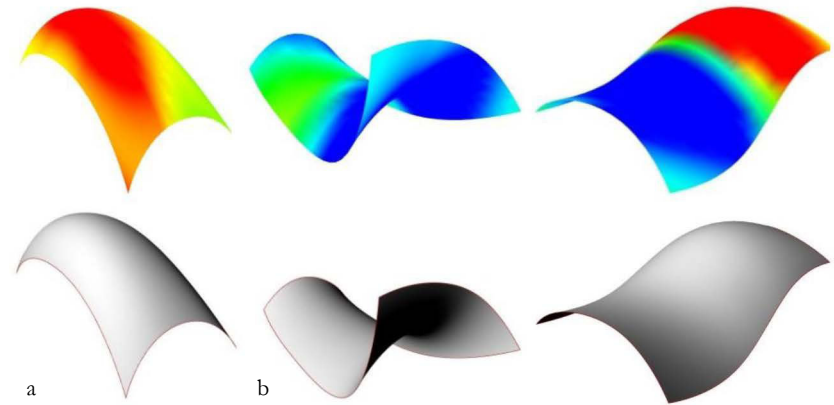
5.32



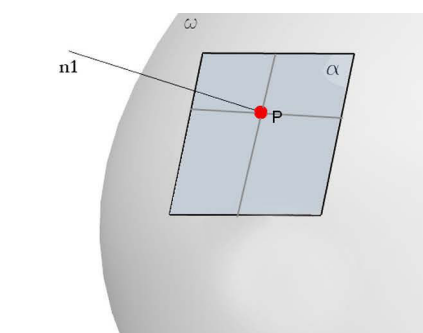
5.33 - La curvatura gaussiana di una superficie in un punto è rappresentata dalla posizione dei cerchi osculatori in quel punto. In P la curvatura è negativa, mentre in Q è positiva: i raggi dei cerchi si trovano dalla stessa parte rispetto alla superficie.

Ciò si verifica se entrambe le curve sono due rette, oppure, se una delle due curve è una retta, e quindi almeno uno dei raggi del cerchio osculatore è infinito. Le superfici a doppia curvatura si distinguono in superfici *sinclastiche*, in cui la curvatura è sempre dello stesso segno in entrambi le direzioni principali, e in superfici *anticlastiche* (o a sella), in cui in ciascun punto si ha curvatura positiva in una direzione e negativa nell'altra.⁶⁰ (fig. 5.34)

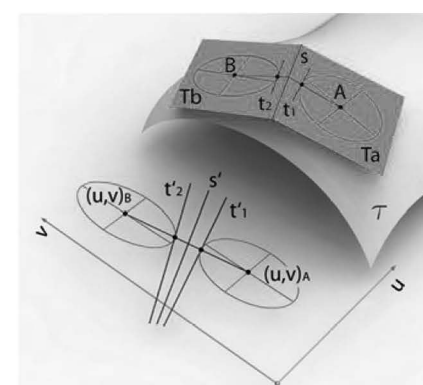
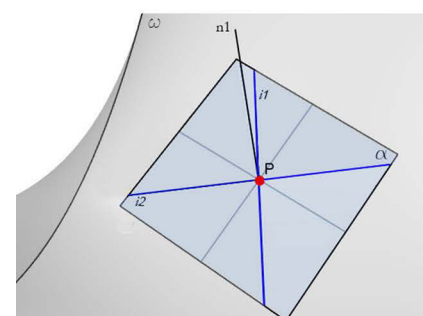
Anche attraverso l'*indicatrice di Dupin* è possibile stabilire se i punti di una superficie sono di tipo ellittico, parabolico o iperbolico:⁶¹ ad essa è legata l'individuazione della direzione delle *tangenti asintotiche* di una



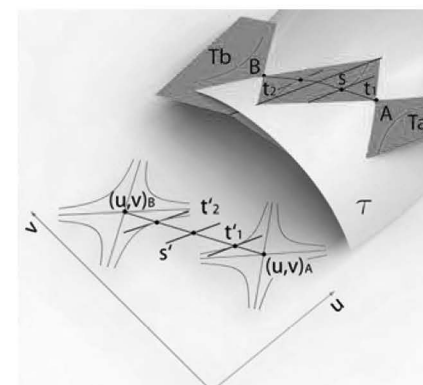
5.34 - Le superfici a doppia curvatura si distinguono in superfici *sinclastiche* (a) in cui la curvatura è sempre dello stesso segno in entrambi le direzioni principali, e in superfici *anticlastiche* (o a sella - b), in cui in ciascun punto si ha curvatura positiva in una direzione e negativa nell'altra



5.35



5.36



5.37, 38 - Indicatrice di Dupin

superficie. Per visualizzare e comprendere meglio il concetto di *direzioni asintotiche*, consideriamo un punto appartenente ad una superficie ω : il piano tangente alla superficie in quel punto può intersecare o meno, in base alla curvatura, la superficie stessa.

Considerato un piano tangente a in un qualsiasi punto P di una superficie ω con curvatura gaussiana positiva, tale piano interseca la superficie solo in corrispondenza del punto stesso (fig.5.36), mentre un piano tangente una superficie con curvatura gaussiana negativa interseca la superficie stessa individuando due curve (fig.5.36).⁶² Le tangenti alle linee di intersezione $i1$ e $i2$ tra la superficie e un suo piano tangente individuano le direzioni asintotiche: pertanto, si definisce linea asintotica una curva le cui tangenti sono tutte tangenti asintotiche.⁶³ Sono dette direzioni asintotiche di una superficie in un punto le direzioni secondo le quali la curvatura normale si annulla.

Si può verificare che:

Se K è negativa, le tangenti asintotiche sono due, reali e distinte;
se K è nulla, le tangenti asintotiche sono due e coincidenti (corrispondono cioè alla generatrice passante per il punto di contatto del piano tangente);
se K è positiva non esistono tangenti asintotiche, infatti la superficie ha un andamento convesso e quindi il piano tangente non la interseca.

In generale, in ogni punto di una superficie esistono dunque due direzioni asintotiche: in accordo con ciascuna di queste possibilità i punti corrispondenti sono iperbolici, parabolici o ellittici.⁶⁴

In una superficie rigata, superficie analitica generata dal movimento di una retta, la presenza di generatrici rettilinee non è una condizione sufficiente affinché una superficie sia sviluppabile: è infatti necessario che una delle due curvature principali sia nulla.⁶⁵

Il paraboloide iperbolico, ad esempio è una rigata, ma è una superficie a curvatura negativa. La curvatura gaussiana determina, dunque, la fondamentale distinzione, importante soprattutto per la fabbricazione, tra superfici rigate sviluppabili e superfici rigate non sviluppabili. Quindi, solo le superfici che presentano $K=0$ sono superfici sviluppabili. Si ricorda che una superficie rigata è sviluppabile quando due generatrici consecutive sono complanari e incidenti.

Le superfici sviluppabili rappresentano un caso speciale e ottimizzato di superfici rigate, in quanto possono essere sviluppate in porzioni di superfici piane senza strappi o deformazioni: grazie a tale proprietà,

queste superfici sono state ampiamente utilizzate in architettura.

Tuttavia, la proprietà più importante, necessaria per aumentare le soluzioni di ottimizzazione del processo di fabbricazione dei pannelli che discretizzano una superficie *free form*, è che tali superfici siano rigate.

A tale proposito, è utile ricordare che assegnata una curva sghemba c , le tangenti a c sono le generatrici di una superficie rigata.

La curva c , luogo delle intersezioni di tali tangenti, è detta spigolo di regresso.⁶⁶ (fig.5.39). Il ricorso a tale proprietà diventa di fondamentale importanza per comprendere i principi posti alla base della trasformazione di una *mesh* composta da facce quadrilateri piane in una striscia sviluppabile. (cfr. cap. VI)

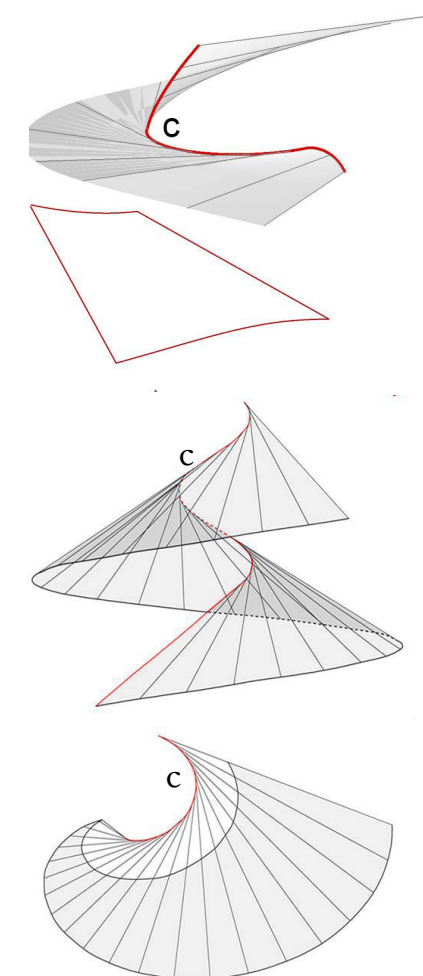
La sviluppabilità di una superficie curva su un piano è una delle caratteristiche che determina la riduzione dei costi di produzione: una porzione di superficie sviluppabile rappresenta un prodotto fisico che potrà essere facilmente ritagliato sul piano e nuovamente curvato nello spazio.

5.3 Classificazione e discretizzazione


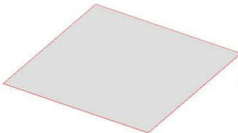
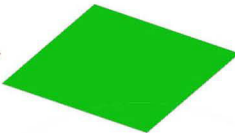
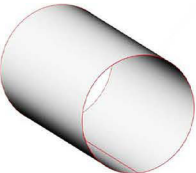
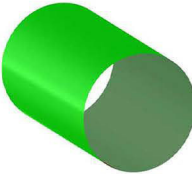
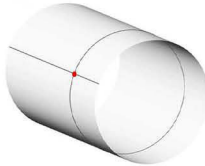
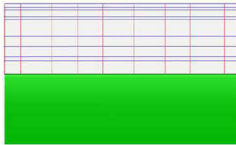
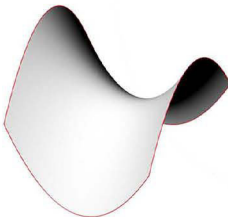
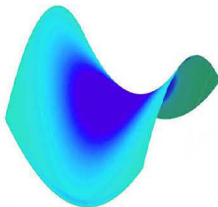
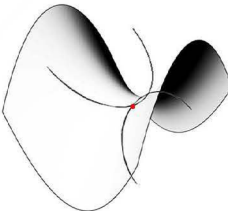
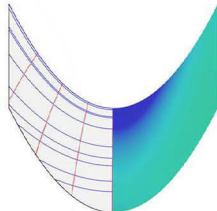

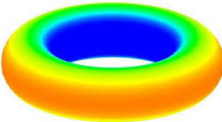
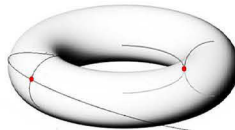
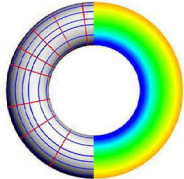

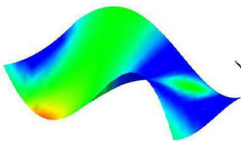
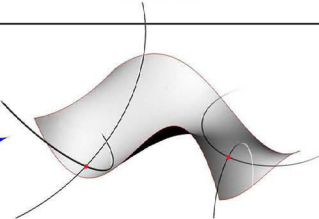
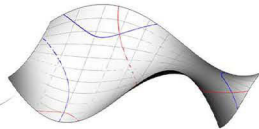
I processi di *paneling* sono strettamente dipendenti dalla natura geometrica delle superfici. A tale proposito sono stati elaborati dei metodi innovativi basati sull'uso di superfici rigate, sviluppabili e non sviluppabili, per pannellizzare involucri e facciate coincidenti con una superficie *free form*: i pannelli distribuiti su tali superfici saranno pertanto più economici da produrre. (cfr. cap. 3)

La Geometria Differenziale classifica le superfici secondo il segno della loro curvatura totale: si è pertanto ritenuto fondamentale utilizzare questo criterio come base per una sistematizzazione grafica delle tipologie di superfici attualmente più economiche ed in uso per il *Panel Fitting*⁶⁷ di superfici complesse (fig.5.40). (cfr. cap. 6)

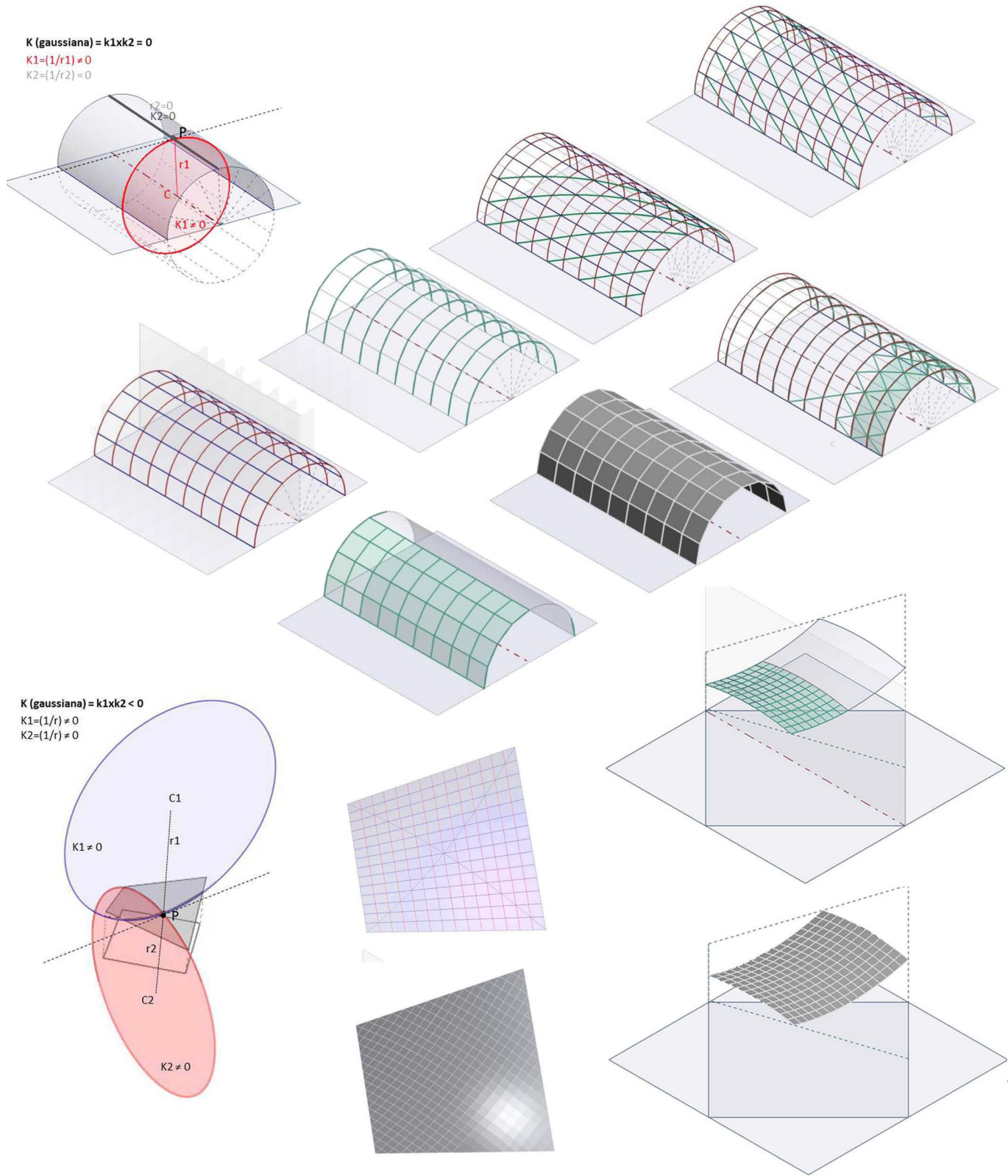
Ricordiamo che le tipologie di pannelli curvi attualmente disponibili per approssimare ed ottimizzare una superficie *free form* sono i piani, i cilindri, i paraboloidi iperbolici, i tori e le strisce sviluppabili. (fig.) Dai grafici (fig.5.41,42) è possibile notare come la curvatura gaussiana della superficie influisca notevolmente sulla discretizzazione della stessa: le reti delle linee di curvatura principale consentono automaticamente la tassellazione in elementi non soltanto triangolari, ma anche in elementi quadrilateri piani.



5.39 - Le tangenti di una curva sghemba coincidono con le generatrici di una superficie sviluppabile. Tale curva è detta *spigolo di regresso*.

CLASSIFICAZIONE DIFFERENZIALE DELLE SUPERFICI						
K > = < 0	SINGOLA CURVATURA		DOPPIA CURVATURA			
	ANALITICHE		COMPLESSE			
	RIGATE (sviluppabili)	PIANO	RIGATE(non svilupp)	PARABOL. IPERB.	TORO	
	CILINDRO					
Superficie		Curvatura gaussiana (K)		K-  K+		
						
						
						
						
						
						
						
						
						

5.40 - Classificazione Differenziale delle superfici.
Le superfici rigate, a singola e a doppia curvatura indicate in tabella corrispondono alle tipologie di pannelli utilizzati per il panel fitting di superfici complesse
5.41 - Discretizzazione di un cilindro
5.42 - Discretizzazione di un paraboloide iperbolico



Si dimostra, inoltre, che la genesi di una superficie influisce in maniera sostanziale sulla successiva fase di discretizzazione.

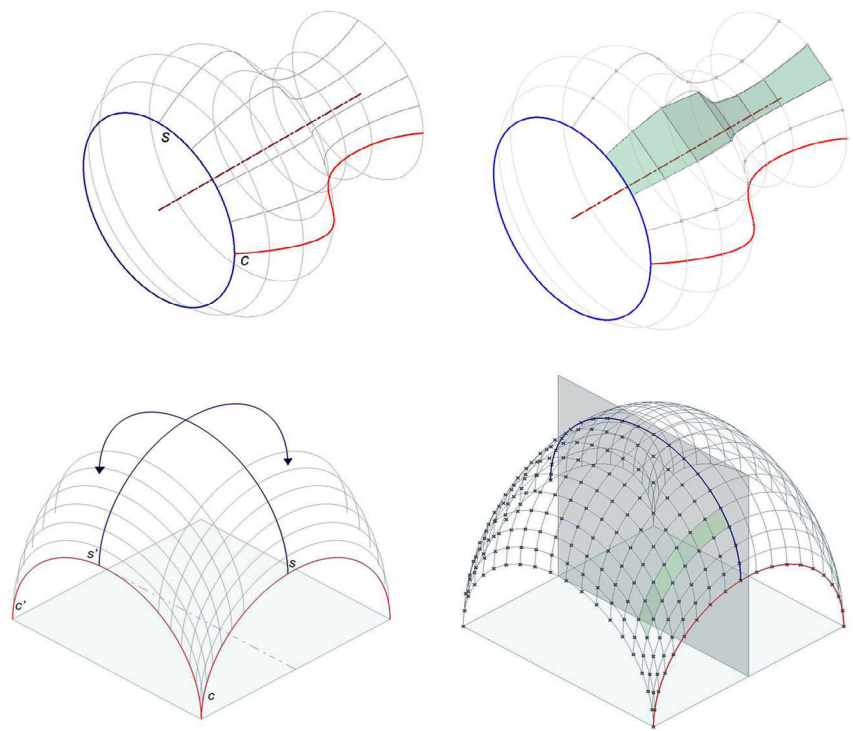
Un ulteriore parametro di classificazione delle superfici, e quindi delle strutture curve, deriva dalle leggi attraverso cui sono generate.

Le più semplici superfici analitiche sono generate dal moto di traslazione e di rotazione. Come è noto, le superfici di traslazione sono generate dal moto di una generatrice, retta o curva, lungo una o più direttrici, che a loro volta possono essere rette o curve.⁶⁸ (fig.5.44)

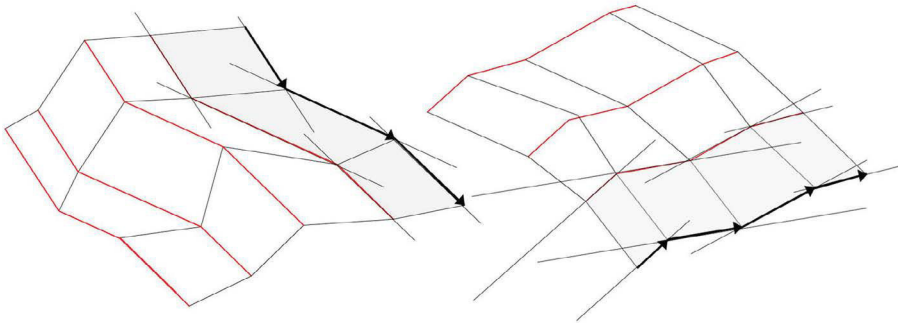
Analogamente, le superfici di rotazione possono essere anche considerate come generate dalla traslazione di una curva generatrice lungo un cerchio (fig.5.43).

La natura delle curve coinvolte nel processo, le quali possono essere analitiche o complesse, influenza la complessità della forma generata in seguito al moto di traslazione o di rotazione.

Si dimostra che a partire da una superficie generata da leggi di moto note è facilmente possibile estrarre degli elementi quadrilateri piani. Questa possibilità deriva dal parallelismo delle corde ottenute dividendo le progressive sezioni delle superfici di traslazione generate che, congiunte tra loro, rappresentano i bordi delle facce.



5.43 - Superficie di rotazione
5.44 - Superficie di traslazione



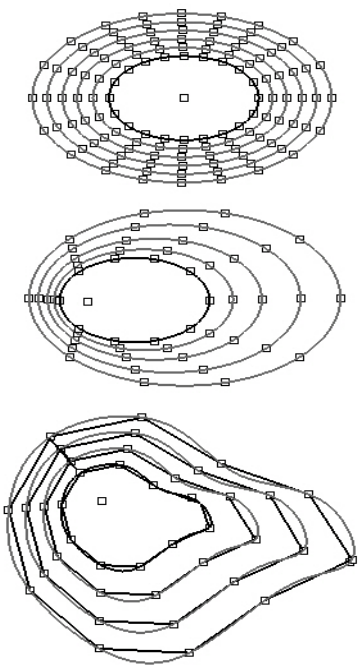
5.45 - Dati due vettori paralleli, essi definiscono sempre una superficie quadrilatera piana.

Trasformando, più volte, in maniera concentrica o eccentrica, una curva di partenza piana, analitica o complessa, e traslando le curve ottenute (future sezioni della forma generata), lungo una curva sghemba o lungo una retta, è possibile generare delle superfici, note in letteratura come *scale-translational surfaces*,⁶⁹ discretizzabili in elementi quadrilateri piani (fig.5.46). Suddividendo le curve-sezione in parti uguali e congiungendo i punti ottenuti è possibile ricavare delle coppie di bordi paralleli, i quali rappresentano i lati delle celle quadrilatere piane.

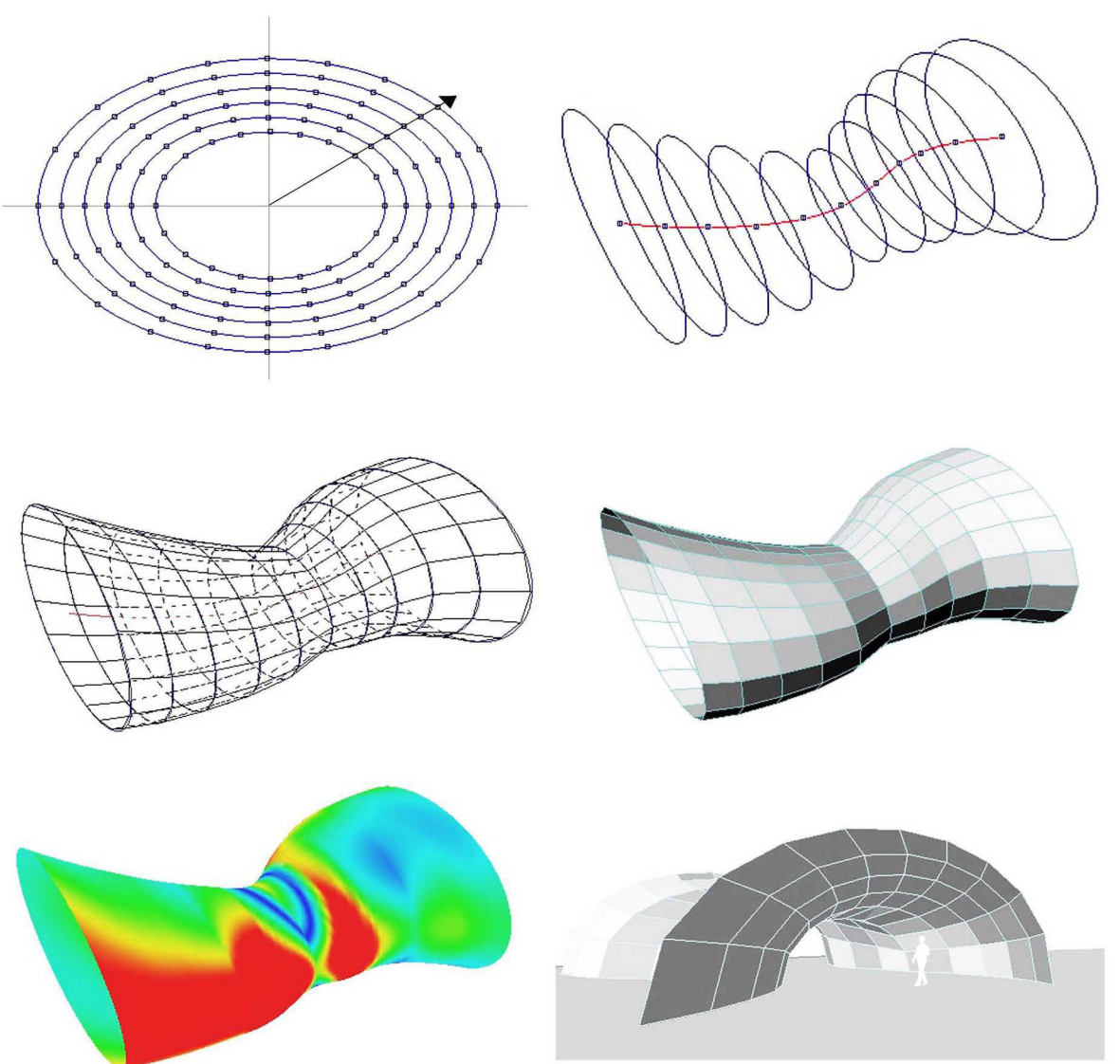
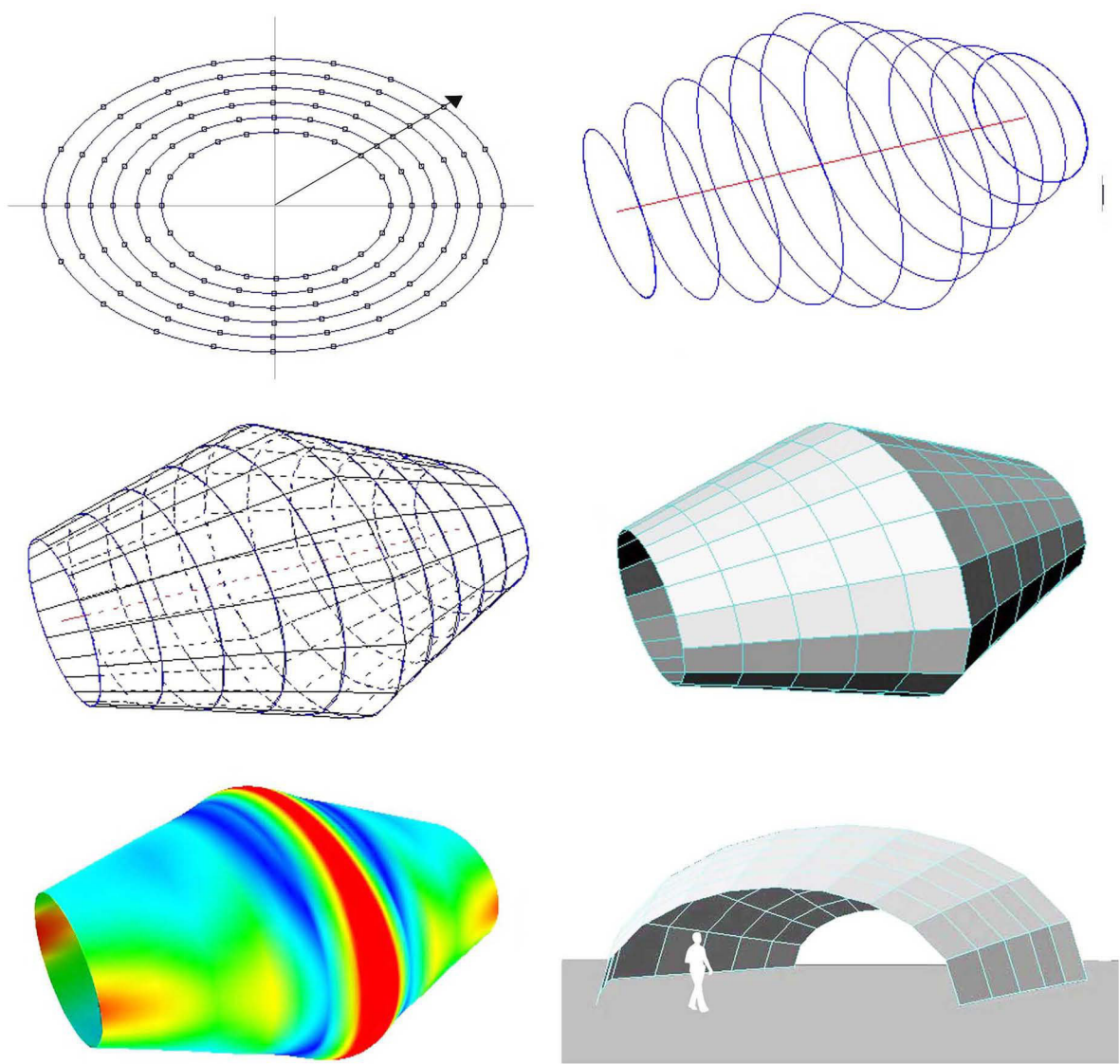
Più in generale, dati due vettori paralleli, essi definiscono sempre una superficie quadrilatera piana: tali vettori, insieme ai bordi di collegamento tra i punti di origine e i punti finali degli stessi, definiscono i quattro lati del perimetro piano di una superficie. (fig.5.45)

Una serie di vettori paralleli genera una riga iniziale della maglia di pannelli piani: la curva che collega gli *end points* dei vettori rappresenta una delle curve di sezione della superficie che si vuole generare.

Seguendo lo stesso principio vengono generate tutte le righe successive. I vettori paralleli possono anche presentare una direzione e una lunghezza diverse rispetto ai precedenti. La scelta arbitraria della lunghezza dei nuovi lati determina la nuova curva di sezione, differente dalla precedente.⁷⁰ Attraverso tale tecnica è possibile realizzare qualsiasi tipo di forma discretizzata in pannelli piani e quadrilateri. Tuttavia, per razionalizzare e per ottimizzare la pannellizzazione di una generica superficie complessa è necessario ricorrere ad appositi algoritmi di suddivisione, di planarizzazione e di ottimizzazione delle superfici e dei pattern coinvolti nel processo.

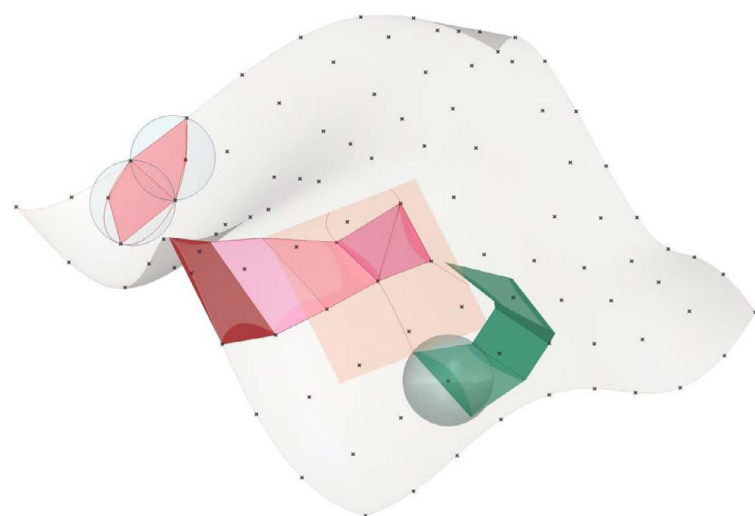


5.46-Espansione centrica o eccentrica di una curva



Il congiungimento dei vertici di una rete poligonale di curve distribuite su una superficie complessa non consente la costruzione di facce piane, ma solo di porzioni di superfici curve, per la cui planarizzazione è necessario ricorrere a delle apposite procedure di tipo matematico ed informatico (cfr. cap.VI).

La qualità del risultato derivante dall'applicazione di tali tecniche è inevitabilmente influenzata dalla natura della superficie da discretizzare. Pertanto, il capitolo successivo mira ad indagare le principali relazioni esistenti tra la curvatura di una superficie complessa e la qualità dei risultati derivanti dai processi che ne consentono la razionalizzazione.



Note

- ¹ R.Ciarloni, *Le teorie e le tecniche della rappresentazione matematica - Strategie di modellazione nei sistemi CAD*, in R. Migliari, Geometria Descrittiva, Volume II – Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, p.8
- ² L. Grigis, *Dalla texture alla forma*, in Evoluzione del mosaico, Atlas, p. 30
- ³ Ibidem
- ⁴ B.Munari, *Design e comunicazione visiva*, Editori Laterza, 1974, pp. 16-17
- ⁵ E. Demartini, C.Gatti, L. Tonetti, E. P. Villa, *Il nuovo Vivere l'arte*, Bruno Mondadori, p. 1371
- ⁶ Molte di queste opere sono conservate a Milano, al Museo del Novecento, nella sezione Piero Manzoni e Azimuth.

⁷ S. Cappelli, *Gli Achromes*, in Archivio opera Piero Manzoni - Fondazione Piero Manzoni - www.pieromanzoni.org, p.2

⁸ Ibidem

⁹ Enrico Castellani - http://it.wikipedia.org/wiki/Enrico_Castellani

¹⁰ E. Demartini, C.Gatti, L. Tonetti, E. P. Villa, Op. cit., p. 1372

¹¹ La parola Cimatica deriva dal greco *Kuma*, il cui significato letterale è flutto, o onda, per descrivere gli effetti periodici che il suono e le vibrazioni hanno sulla materia, da Cimatica - <http://testi-italiani.it/cymatics>

¹² Cimatica - <http://it.wikipedia.org/wiki/Cimatica>

¹³ B.Munari, Op. cit., p. 78

¹⁴ H. Jenny, *Kymatic*, Basilius Press, 1967 – H. Jenny, *Cymatics*, Macromedia, 2001

¹⁵ cfr. cap. IV

¹⁶ R.Ciarloni, Op. cit., p. 34

¹⁷ Attualmente, diversi software di modellazione, tra cui *Rhinoceros* (Robert Mc Neel & Associates), *ThinkDesingn* (Think3), dispongono di tali strumenti per la diagnostica di curve e superfici.

¹⁸ B. Kolarevic, *Digital Morphogenesis*, cap. II, pp. 14-15, in *Architecture in the Digital Age*, 2003

¹⁹ Ibidem

²⁰ Ibidem

²¹ Ibidem

²² Guy Waldo Dunnington, *Carl Friedrich Gauss: Titan Of Science*, The Mathematical Association of America, 2003, pp.497-499

²³ C. F. Gauss, *Disquisitiones generales circa superficies curvas*, 1923

²⁴ A. Gottfried, *Le strutture*, in Manuali di progettazione edilizia, Hoepli Editore, 2003, p. 210

²⁵ R. Ciarloni, Op. cit., pp. 35

²⁶ R. Ciarloni, Op. cit., pp. 36

²⁷ Ibidem

²⁸ R. Ciarloni, Op. cit., p. 22

²⁹ R. Ciarloni, Op. cit., pp. 42-43

³⁰ R. Migliari, Geometria Descrittiva – Volume II – Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, Prefazione, p. XI

³¹ C. Trevisan, *Spline-Nurbs*, IUAV, Disegno Digitale

³² Y. He, *Implementing Customized Metal Panels in Architectural Freeform Surfaces*, Faculty of Architecture, Delft University of Technology, 2014, p.4

³³ Per una trattazione più approfondita sui differenti tipi di curve analitiche, a poli e procedurali, *Polinomi di Bernstein, Bézier, B-Splines, Nurbs*, sui

concetti di grado, di peso dei relativi poli o punti di controllo, sulle relative capacità di rappresentazione di forme più o meno complesse e sulle omonime tipologie di superfici che ne derivano, si rimanda ai numerosi studi esistenti e pubblicati sull'argomento.

³⁴ Y. He, *Op. cit.*, pp 6-8

³⁵ L. De Carlo, *Le linee curve*, in Geometria Descrittiva – Volume II – Tecniche e Applicazioni, p. 99

³⁶ R. Migliari, F. Fallavolita, M. Salvatore, *Superfici*, in Geometria Descrittiva - Volume II – Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, p. 144

³⁷ L.De Carlo, *Op. cit.*, p. 100

³⁸ R. Ciarloni, *Op. cit.*, p. 29

³⁹ L. De Carlo, *Le linee curve piane*, in R. Migliari, Geometria Descrittiva, Volume II – Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, p. 102

⁴⁰ Ibidem, p.103

⁴¹ R. Ciarloni, *Continuità tra curve*, in R. Migliari, *Op. cit.*, p.32

⁴² Ibidem

⁴³ Ibidem, p. 31

⁴⁴ Ibidem, p. 43

⁴⁵ R. Ciarloni, *Continuità tra superfici*, in R. Migliari, *Op. cit.*, p.33

⁴⁶ Ibidem

⁴⁷ R. Migliari, *La curvatura delle superfici*, in *Op.cit.*, p. 148

⁴⁸ A. Schiftner, *Planar quad meshes from relative principal curvature lines*, Diploma Thesis, supervised by o.Univ-Prof. Dr. Helmut Pottmann, Institute of Discrete Mathematics and Geometry Vienna University of Technology, p.12

⁴⁹ R. Migliari, *La curvatura delle superfici*, in *Op.cit.*, p. 151

⁵⁰ R. Migliari, *Ibidem*

⁵¹ L.Baglioni, *Nuove applicazioni della geometria descrittiva: le PQ mesh nell'architettura contemporanea*, in Disegnare con, 9 giugno 2012, p. 272

⁵² Ibidem, pp. 272, 273

⁵³ Y. Liu, H. Pottmann, J. Wallner, Y-L. Yang, W. Wang, *Geometric Modeling with Conical Meshes and Developable Surfaces*, p. 3

⁵⁴ M. Manetti, *Superfici in R3*,

<http://web.math.unifi.it/users/dini/davinc2.pdf>, p.8,

⁵⁵ In un ellissoide sono presenti 4 punti di singolarità distribuiti in maniera simmetrica sulla superficie

⁵⁶ Berry, M V; Hannay, J H. “*Umbilic points on Gaussian random surfaces*”, in

J. Phys. A: Math. Gen., Vol. 10, No. 11, 1977, p. 1810

⁵⁷ Berry, M V; Hannay, J H, Ibidem, p. 1811

⁵⁸ *Types of Riemann/Gauss Curvature*, (2013) , pp. 6-8, <http://www.the-physicsmill.com/2013/03/17/for-there-we-are-captured-the-geometry-of-spacetime/>

⁵⁹ R. Migliari, F. Fallavolita, M. Salvatore, *Op. cit.*, p. 144

⁶⁰ A. Gottfried, *Strutture a superficie curva continua*, in Le strutture, Hoepli Editore, p. 209

⁶¹ Stavric M., Wiltsche A., Freissling C., *Discretization of free-form surfaces by plane elements derived from tangent planes*, in Glass Performance Days 2011 - www.gpd.fi, p.2

⁶² R. Migliari, *La continuità di una superficie e il piano tangente*, in *Op.cit.*, p. 148

⁶³ Ibidem

⁶⁴ R. Migliari, *La curvatura delle superfici*, in *Op. cit.*, p. 151

⁶⁵ F. Fallavolita, *Le rigate sviluppabili*, in R. Migliari, *Op. cit.*, p. 161

⁶⁶ F. Fallavolita, *Op. cit.*, p. 160

⁶⁷ Eigensatz M., Deuss M., Schiftner A., Kilian M., Mitra N. J., Pottmann H., Pauly M., *Case Studies in Cost-Optimized Paneling of Architectural Freeform Surfaces*, C. Ceccato et al., Advances in Architectural Geometry 2010, Springer, 2010, p. 73

⁶⁸ cfr. L. Baglioni, *Considerazioni di carattere geometrico e strutturale*, in R.Migliari, *Op. cit.*, p. 378

⁶⁹ cfr. J. Glymph, D. Shelden, C.Ceccato, J. Mussel, H. Schober, *A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets*, in Automation in Construction 13 (2004), p. 193

⁷⁰ Ibidem

**Complex Surfaces:
pattern & optimized paneling**

Life is like riding a bicycle. To keep your balance, you must keep moving

Albert Einstein

6.1 Le tre tassellazioni regolari: i *pattern* “funzionali”.

La natura delle superfici ed i risultati derivanti dai processi di razionalizzazione ad oggi noti sono legati da importanti relazioni geometriche.

Una superficie può essere realizzata mediante la sua suddivisione in singoli elementi tra loro connessi: come anticipato, i pannelli possono essere piani o curvi, presentare diversa geometria e uno specifico pattern distributivo. E’ fondamentale riflettere sulla differenza tra la realizzazione di un sistema composto da celle sghembe aventi una specifica forma geometrica, delimitate da segmenti curvi, e la planarizzazione o la trasformazione delle patch a doppia curvatura in pannelli piani.

La tesi vuole dimostrare quanto la stessa natura geometrica delle superfici sia capace di suggerire la migliore soluzione possibile al problema. Un *pattern* rappresenta un mezzo capace di rivelare lo schema strutturale di una serie di dati, la cui regola o sequenza diviene esplicita, quindi visualizzabile attraverso dei segni grafici. Può rappresentare la ripetizione regolare, semi-regolare o irregolare di un insieme di elementi geometrici.¹ A tale proposito, com’è possibile dedurre da specifiche ricerche condotte in merito,² i sistemi di tassellazione rappresentano la tipologia di pattern più semplice per ricoprire una

superficie piana o spaziale con una o più figure geometriche replicate all'infinito, senza produrre lacune o sovrapposizioni.³

Sulla base dei risultati derivanti dall'osservazione del campione analizzato e data la complessità delle forme oggetto di studio, tra le differenti e numerose tipologie di tassellazioni esistenti, divise tra periodiche e aperiodiche⁴ e monoedrali e n-edrali⁵, viene indagata l'applicazione dei pattern triangolare, esagonale e quadrangolare alle superfici complesse (fig.6.1). Per ottenere un sistema discreto prestante dal punto di vista tecnologico, economico ed estetico, è importante che i vertici dei tasselli siano il più possibile uniformemente distribuiti nello spazio.⁶

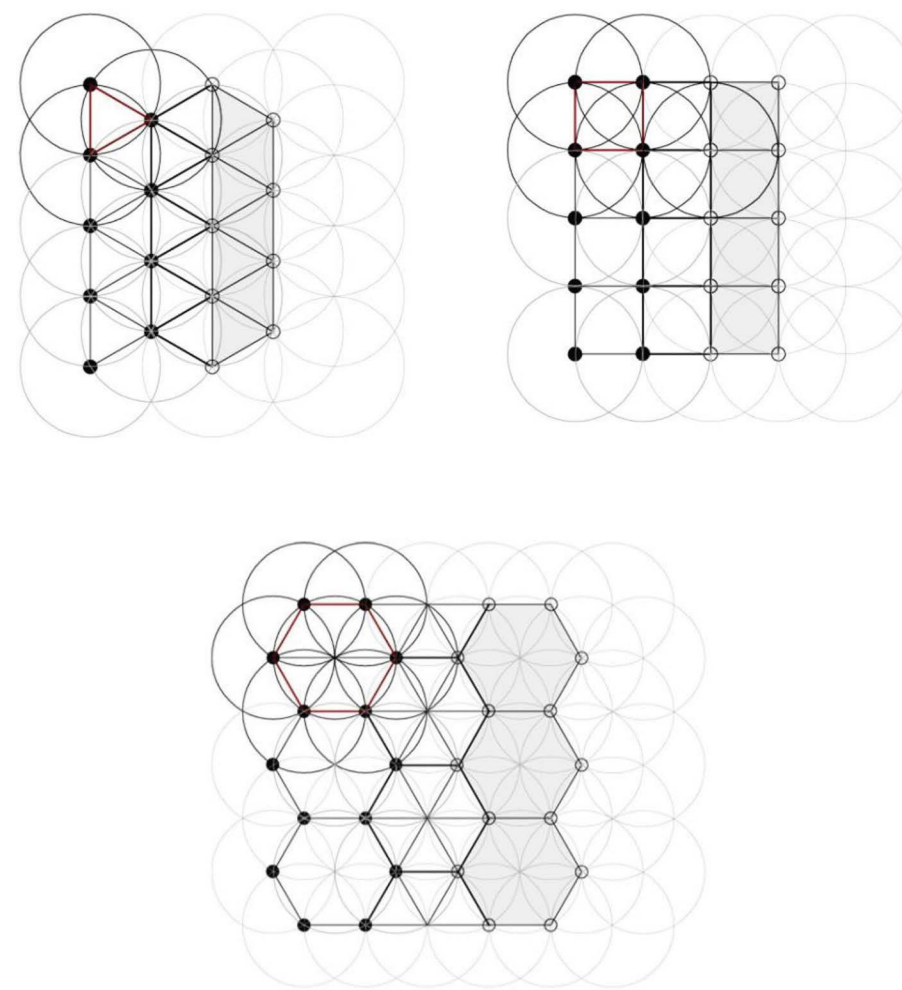
L'utilizzo di forme essenziali e regolari rappresenta la soluzione ottimale. Dunque, mirare alla standardizzazione dei vari elementi coinvolti rappresenta una condizione di grande importanza per ottimizzare l'approccio alla fabbricazione sul piano computazionale ed economico – costruttivo. Estendendo il discorso dal piano allo spazio, è noto che le facce, triangolari, quadrilatere ed esagonali che delimitano il volume dei cinque poliedri regolari sono uguali per ciascuno di essi. Nel caso di una superficie complessa non è altrettanto semplice ottenere questo risultato: la prima causa risiede proprio nella variazione di curvatura della stessa. Se da un lato i nuovi strumenti digitali consentono ai progettisti di sviluppare liberamente la loro espressività formale, dall'altro tale libertà comporta la ricerca di una soluzione ai problemi legati alla realizzazione di tali forme, esigenza che richiede la messa a punto di strumenti computazionali sviluppati ad hoc per la suddivisione e la planarizzazione delle superfici. Obiettivo fondamentale della ricerca è la sistematizzazione delle tecniche di discretizzazione delle superfici complesse. Sono state quindi indagate le potenzialità e le problematiche geometrico-generative delle tipologie di pattern indicate, senza approfondire la questione dal punto di vista strutturale. Il punto di partenza per la creazione di un pattern geometrico è la circonferenza.

Tutte le tipologie, più o meno complesse, di genesi e di distribuzione di tasselli piani su una superficie, che sia essa piana o curva, fanno sempre riferimento alla primitiva figura geometrica del cerchio. Congiungendo i punti ottenuti dall'intersezione di diverse circonferenze, a loro volta distribuite secondo un preciso pattern, è possibile costruire i diversi poligoni.⁷

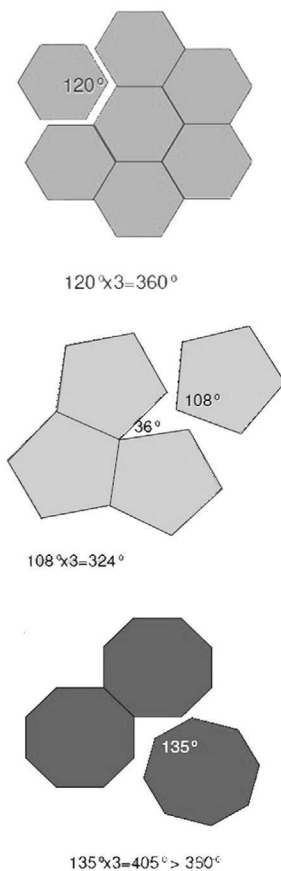
Sul piano euclideo è sempre possibile ottenere delle tassellature iso-

edrali regolari, cioè tassellature di tipo monoedrale composte da tessere tutte uguali.⁸ L'equipartizione regolare del piano è anche detta isomorfa, in quanto composta da un solo tipo di poligoni regolari.

Esistono solo due tipi fondamentali di questi reticoli, quello a due direzioni ortogonali, proprio della maglia quadrata, e quello a tre direzioni, con angoli di 120°, relativo alla griglia triangolare ed esagonale. In un reticolo si distinguono i nodi (gli incroci del reticolo), le aste (i lati dei poligoni) e le regioni (i poligoni che compongono la griglia) (fig.6.1). E' dunque possibile leggere un reticolo come sistema di punti, di segmenti o di figure piane.⁹

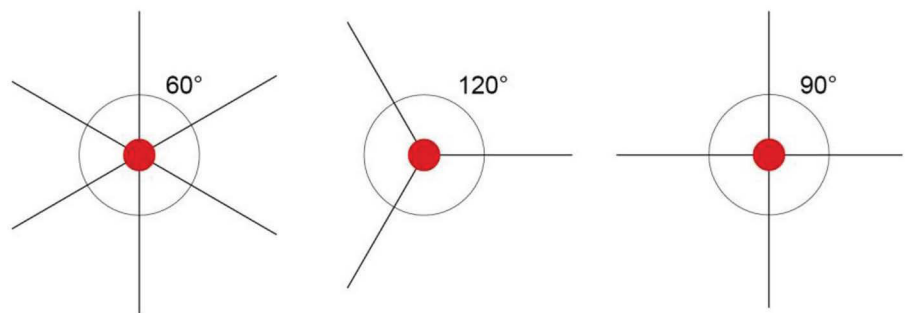


6.1 - In un reticolo è possibile distinguere nodi, aste e regioni.



6.2 - Per chiudere il piano la somma degli angoli individuati dalle aste che convergono in un nodo deve essere pari a 360°
6.3 - Solo 3 poligoni soddisfano tale condizione: il triangolo equilatero, l'esagono regolare e il quadrato.

In un *pattern* geometrico, il numero di lati che concorrono in ogni nodo definisce la valenza del vertice e costruttivamente si traduce nel numero di aste o di bordi dei tasselli. Considerando il nodo di un reticolo, per chiudere lo spazio bidimensionale, la somma degli angoli compresi tra le aste che vi convergono deve essere sempre pari a 360°. Si dimostra che solo tre poligoni soddisfano tale condizione: il triangolo equilatero (60°), il quadrato (90°), e l'esagono regolare (120°) (fig.6.3).¹⁰

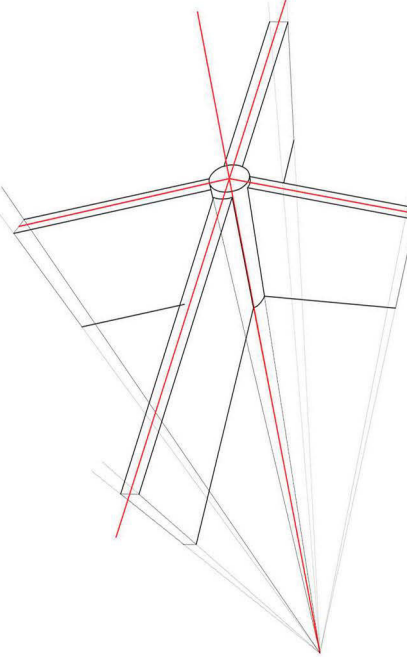


Alla base degli algoritmi di planarizzazione vi è la ricerca di tale condizione. Dalla combinazione dei tre pattern regolari derivano una serie di tassellazioni semi-regolari, note anche come tassellazioni di Archimede,¹¹ le quali sono modulari, ma non ottimali dal punto di vista costruttivo. La triangolazione rappresenta, da sempre, il metodo più immediato per la discretizzazione di superfici continue, qualunque curvatura esse presentino. Oggi sono disponibili numerosi algoritmi per la triangolazione di superfici, molti dei quali sono però stati sviluppati e potenziati per la risoluzione di specifici problemi di grafica 2D e 3D, molto diffusi nel campo dell'*entertainment*¹² e capaci di gestire le esigenze legate al rendering, operazione necessaria per la rappresentazione foto-realistica dei modelli digitali e per la gestione dei *computer games* e della *character animation*.¹³ E' interessante sottolineare come sia necessario, tanto per ricavare un'immagine foto realistica da un modello, tanto per realizzare fisicamente un'opera, ricorrere comunque ad un'operazione di tassella-

zione di un sistema continuo di partenza. Tuttavia, dal punto di vista tecnologico-costruttivo, il pattern triangolare presenta il maggiore numero di problemi. Lo svantaggio principale è rappresentato dalla valenza dei suoi vertici, che determina un numero elevato di aste o di bordi dei pannelli che concorrono in un unico nodo centrale di raccordo di sei facce triangolari adiacenti, aumentando la complessità delle modalità di fabbricazione dei nodi stessi e dunque i relativi costi.¹⁴ Altri svantaggi che ne derivano sono il basso grado di trasparenza, dovuto alla presenza di nodi molto fitti (problema emergente soprattutto nel caso di involucri vetrati), una relativa pesantezza della struttura di supporto e la torsione geometrica dei nodi (fig.6.4) Ciò comporta delle criticità e delle limitazioni importanti dal punto di vista funzionale ed estetico. Le mesh triangolari presentano comunque diversi vantaggi, tra cui un buon grado di approssimazione della superficie d'input, un'intrinseca stabilità della struttura portante, facce piane, anche se non sempre regolari, e riconoscibilità del pattern. Di contro, esistono diversi vantaggi che accomunano il pattern esagonale e quello quadrangolare, capaci di dimostrarne la maggiore sostenibilità rispetto a quello triangolare. Tuttavia, questi due pattern generano diverse limitazioni di carattere geometrico in fase di planarizzazione, operazione necessaria per la realizzazione di sistemi discreti.¹⁵ Un importante vantaggio del pattern quadrangolare è che, rispetto al pattern triangolare, i suoi nodi sono più semplici da realizzare, più leggeri e liberi da sollecitazioni di torsione. E' infatti possibile individuare i piani di simmetria degli elementi che costituiscono la struttura portante dei pannelli, o travi, rispetto ad un asse centrale verticale uscente da ciascuno dei nodi che compongono la struttura.(fig.6.5) Inoltre, tali proprietà comportano un ulteriore vantaggio dal punto di vista economico, e cioè la riduzione del quantitativo di materiale necessario, da cui una conseguente riduzione dei costi complessivi. Il pattern esagonale e quello quadrangolare consentono una buona resa funzionale ed estetica della superficie, tra cui una maggiore trasparenza nel caso in cui i tasselli siano in vetro: tale vantaggio deriva dal minore numero di aste concorrenti in ciascuno dei nodi.¹⁶



6.4



6.5

E' interessante, a dimostrazione e a conclusione di tali considerazioni, calcolare il rapporto numero di aste - superficie per nodo. La superficie è l'area delimitata dalle perpendicolari al punto medio delle aste che gravano su un nodo (fig.6.6).¹⁷

Rapporto aste/superficie per nodo:

pattern triangolare: $6/2 : 0,86 = 3,48$

pattern esagonale: $3/2 : 1,3 = 1,15$

pattern quadrato: $4/2 : 1 = 2$

Rapporto nodo/superficie per nodo o densità:

pattern triangolare: $1:0,86 = 1,16$

pattern esagonale: $1:1,3 = 0,76$

pattern quadrato: $1:1 = 1$

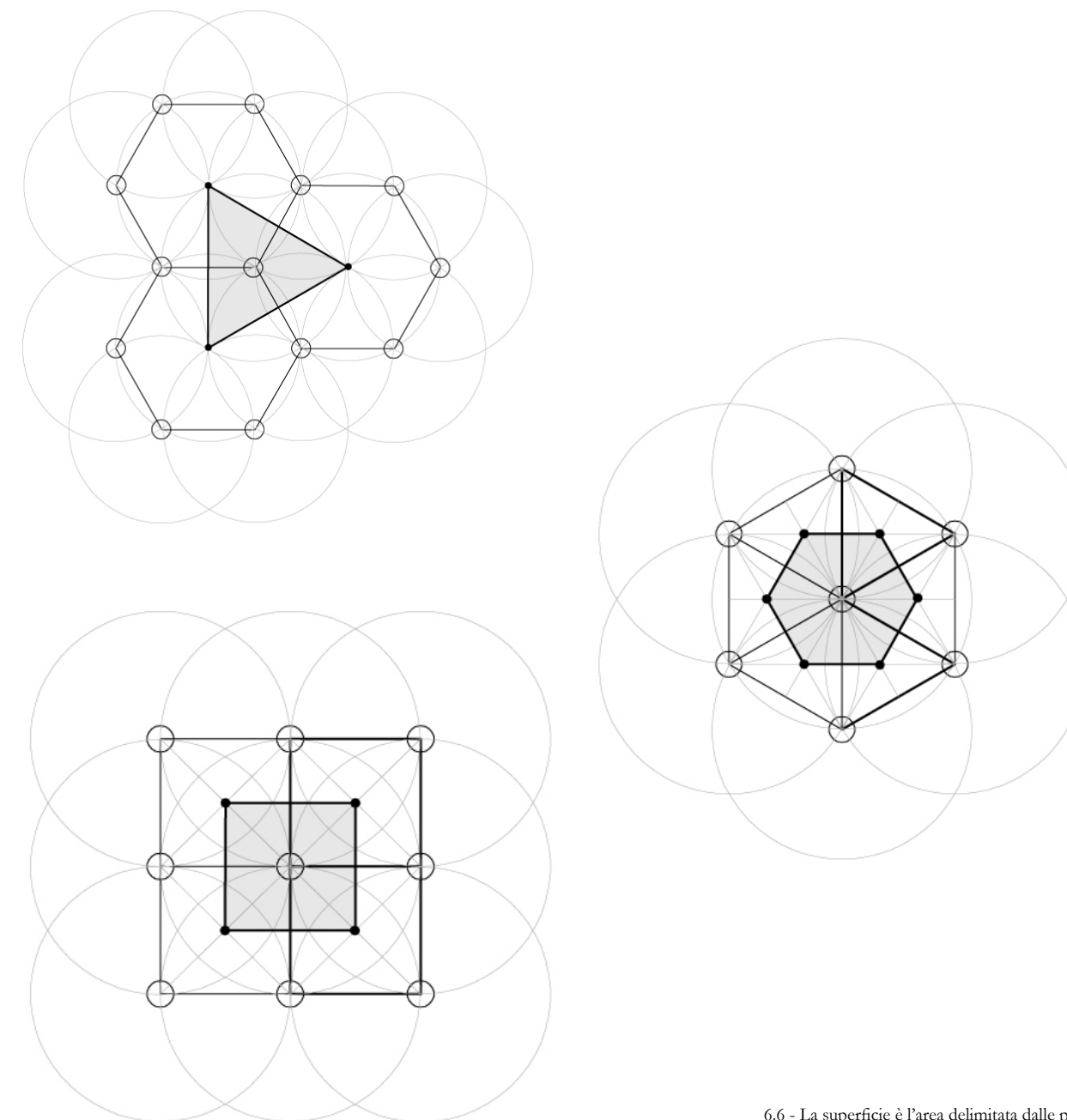
Quindi, è possibile concludere che, a parità di dimensioni dell'asta, supposta di lunghezza unitaria, il reticolo triangolare risulta essere quello per il quale i due rapporti calcolati assumono i valori più alti, mentre quello esagonale risulta essere quello per il quale i valori sono più bassi.

Tra i vantaggi del pattern esagonale e del pattern quadrilatero vi è, inoltre, la possibilità di eseguire l'*offset* del sistema discreto (cfr. par. 6.3), sempre a condizione che la tassellazione non presenti discontinuità o lacune, che l'orientamento delle facce sia regolare e che ciascun bordo sia condiviso solo da due tasselli.¹⁸

Questa proprietà rappresenta una condizione favorevole per la realizzazione di sistemi multistrato¹⁹ e consente, inoltre, di realizzare strutture tridimensionali di tipo monolitico.

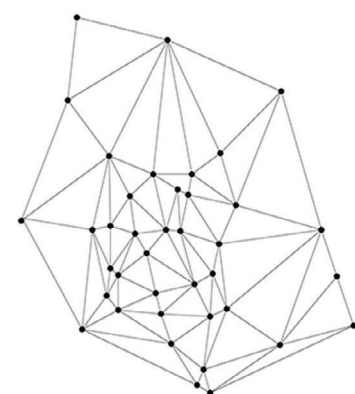
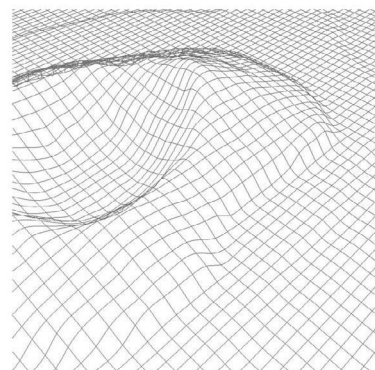
Tale vantaggio spinge la ricerca a considerarne le possibili ricadute nell'ambito della *Digital Stereotomy*, come accennato all'interno dell'ultimo capitolo della tesi.

Le riflessioni effettuate, unitamente alla scarsa realizzazione di sistemi realizzati mediante l'assemblaggio di elementi esagonali, dimostrata dai risultati derivanti dall'analisi del campione di casi (cfr. cap IV), conferma la necessità di un approfondimento di questo sistema di tassellazione per la discretizzazione di superfici complesse. Analogamente, è importante approfondire le proprietà delle mesh quadrangolari, le quali possiedono delle interessanti proprietà geometriche



6.6 - La superficie è l'area delimitata dalle perpendicolari al punto medio delle aste che gravano su un nodo.

6.2 I modelli discreti: distribuzione e ottimizzazione di pannelli piani



6.7 - Esempio di quadrilateral mesh
6.8 - Una mesh nasce dal congiungimento di una serie di punti

Nel panorama nazionale sono stati compiuti diversi studi di sistematizzazione e di approfondimento sulla tassellazione del piano e delle superfici continue,²⁰ sicuramente più immediata da ottenere rispetto alla tassellazione di superfici complesse.

Come anticipato (cfr. cap. IV), per discretizzare una superficie complessa sono necessari appositi algoritmi di tassellazione, di suddivisione e, nel caso dei *pattern* esagonale e quadrilatero, di planarizzazione.²¹

Nell'ambito degli studi sulla tassellazione di superfici, i processi di generazione delle *mesh* rappresentano un campo specifico di ricerca e di applicazione dell'informatica: la sua vastità richiede una ricognizione degli algoritmi utilizzati dai vari software industriali, oltre che di approfondite competenze di tipo informatico e matematico.²²

La Geometria Differenziale Discreta studia le proprietà ed i comportamenti al limite delle *mesh*.

Grazie alla Geometria Descrittiva è possibile esplicitare i principi posti alla base dei processi più diffusi: lo scopo non è un'elencazione dettagliata di tutti gli algoritmi di *meshing* esistenti e dei principi matematico – informatici annessi, ma è soprattutto quello di comprendere i passaggi che consentono l'ottimizzazione distributiva e, quando necessaria, la planarizzazione dei tasselli che compongono le mesh distribuite sulle superfici di partenza.

Una mesh, qualsiasi sia il suo *pattern*, nasce dal congiungimento di un insieme di punti (fig. 6.8): ciò, ovviamente, non significa che tali elementi siano sempre piani. Il raggiungimento di tale condizione dipende strettamente dal tipo di pattern scelto e dalla curvatura della superficie.

In una *mesh*, aperta o chiusa, più comunemente nota come la rappresentazione discreta di una superficie continua o come il modello numerico ottenuto a partire da un modello matematico,²³ i punti vengono definiti vertici, il collegamento di una coppia di vertici viene definito bordo delle celle, mentre gruppi di tre o più vertici collegati tra loro generano facce piane o anche poligoni sghembi.²⁴

Se immaginiamo la morfologia di un involucro o di una facciata è utile indagare il problema della pannellizzazione su *mesh* di tipo re-

golare, e soprattutto di tipo *2-manifold*, cioè composte da tasselli i cui bordi non devono connettere un numero di facce superiore a due (fig.9,10).²⁵

Inoltre, è di fondamentale importanza orientare in maniera corretta le facce che compongono il sistema discreto.

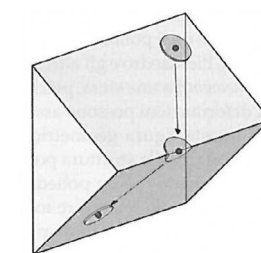
L'orientamento, indicato dalla direzione delle normali uscenti dalle facce (fig.6.11), è legato all'ordine di distribuzione dei vertici durante la fase di costruzione del tassello (fig.6.12). Pertanto, una *mesh* è definita orientata se le facce sono orientate in modo coerente, orientabile, se tale orientazione è possibile. Il corretto orientamento è fondamentale per effettuare l'eventuale *offset* del sistema discreto di partenza.²⁶

Rispetto alle superfici NURBS, è noto che le *mesh* sono facilmente gestibili e possono essere oggetto di scambio tra diversi software.

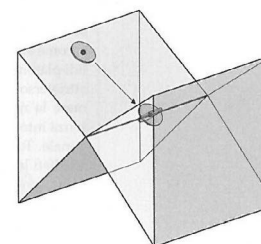
Pertanto, diverse applicazioni pratiche hanno richiesto lo sviluppo di appositi algoritmi e processi di remeshing delle superfici.²⁷

Il problema della pannellizzazione di superfici complesse presuppone la disponibilità e la padronanza di potenti software computazionali e la consapevolezza dei principi di base degli appositi algoritmi esistenti. La configurazione finale potrà essere di tipo ottimale o sub-ottimale in base al livello di approssimazione con cui i requisiti prefissati saranno soddisfatti.²⁸

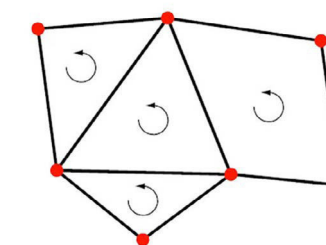
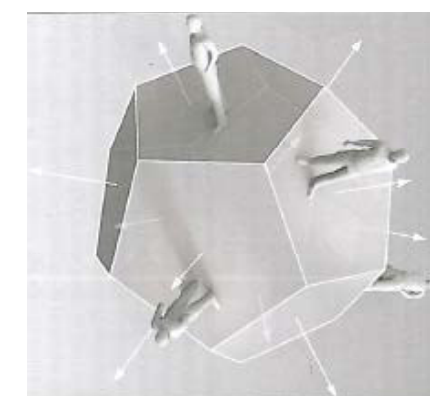
Esistono diversi tools per la tassellazione delle superfici complesse, tra cui i *plug-in Paneling Tools* di *Rhino*, e *Lunch Box*, *add-on* di *Grasshopper* creato da Nathan Miller nel 2012.²⁹ *Paneling Tools* è un *plug-in* di *Rhino* realizzato per la pannellizzazione di superfici e poli-superfici NURBS: genera pattern di celle 2D e 3D distribuendoli su griglie rettangolari e razionalizza le geometrie complesse in un formato adatto all'analisi ed alla fabbricazione. E' uno strumento che si integra perfettamente con *Rhino* ed è usato ampiamente nella progettazione architettonica. Tuttavia, l'applicazione di questi *tools*, escludendo il caso delle tassellazioni triangolari, non consente la distribuzione di elementi piani sulle superfici di input, ma genera una rete poligonale regolare sulla stessa, i cui elementi presentano la forma geometrica e le modalità distributive desiderate, ma i cui bordi sono gli spigoli di figure sghembe. In questi *tools*, le curve della superficie che costituiscono la griglia di base utilizzata per distribuire i pannelli sono le curve iso-parametriche.



a



b

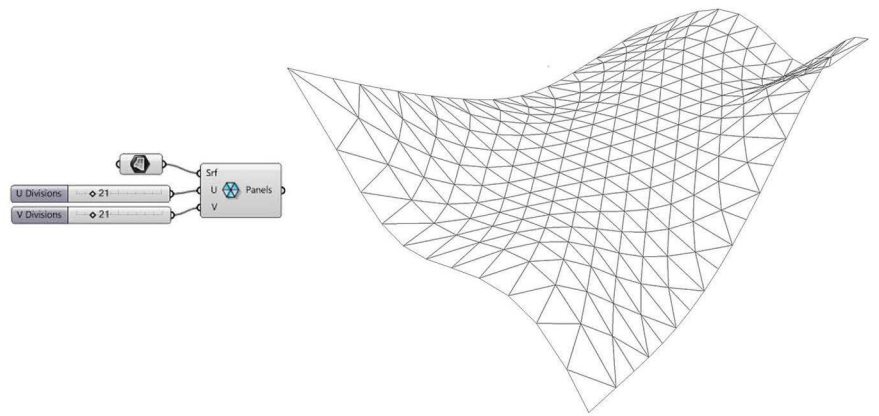
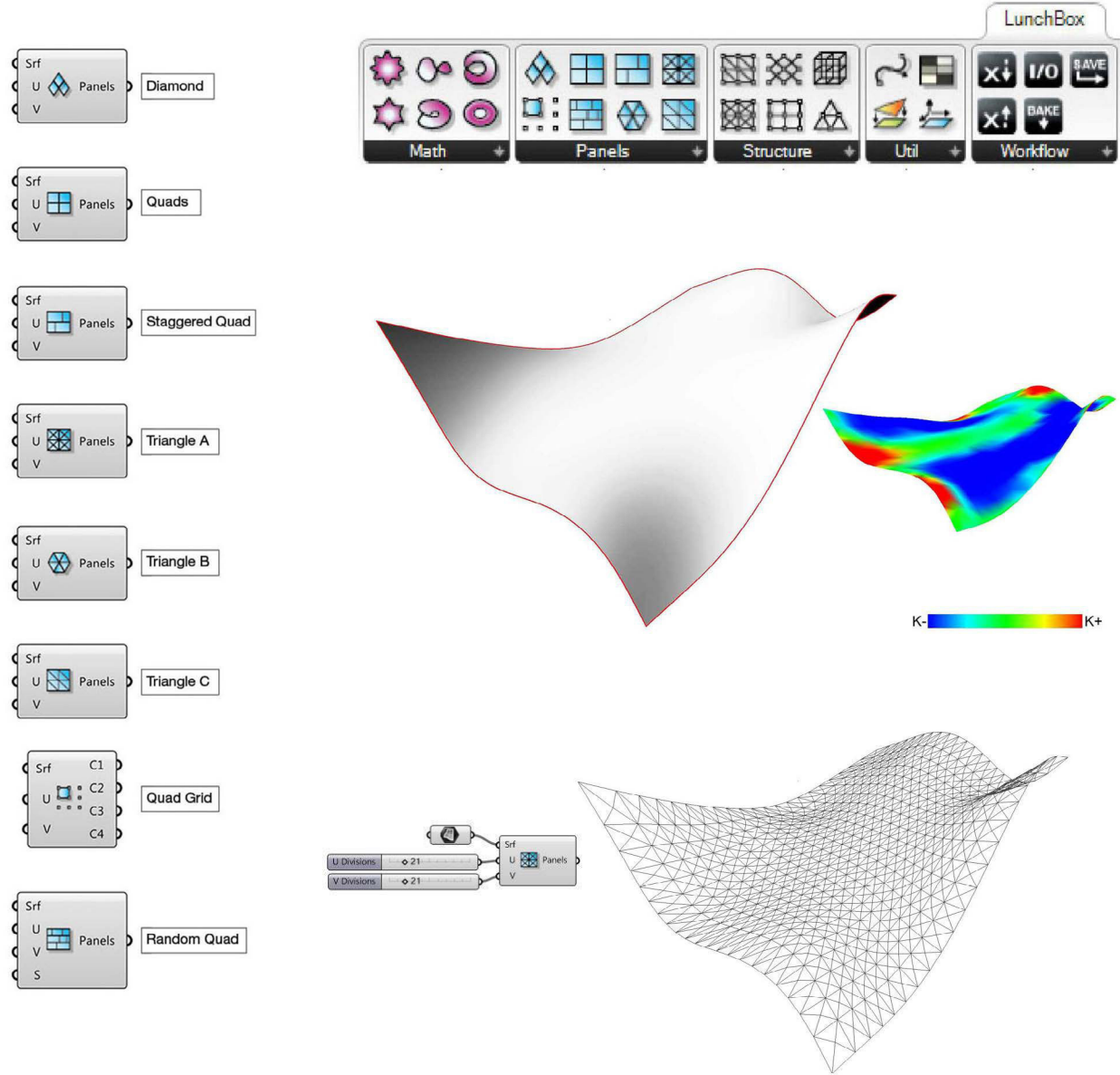


6.9 - Esempio di superficie 2-manifold
6.10 - Nella mesh in figura più di due facce condividono un bordo. Pertanto la mesh è non 2-manifold
6.11,12 - L'orientamento di una mesh è indicato dalla direzione delle normali uscenti dalle facce. L'orientamento è legato all'ordine di distribuzione dei vertici delle facce.

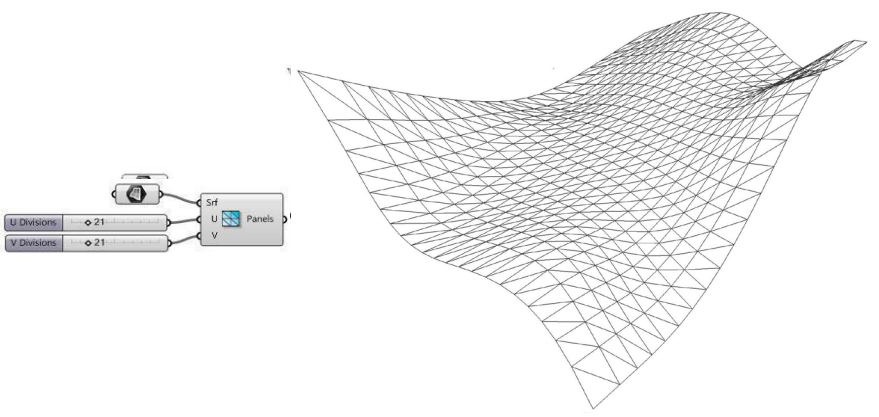
6.13 - Barra dell'add-on *Lunchbox* (*Grasshopper*).
6.14 - In colonna: le tipologie di *pattern* disponibili per il *paneling* di superfici.
6.15 - Superficie a doppia curvatura variabile.
6.16 - Distribuzione del *pattern Triangle A*

In *Lunch Box* sono disponibili diverse tipologie di texture per il *paneling*: tre tipi di pattern triangolari (equilateri, rettangoli ed isosceli), rispettivamente denominate con i nomi *Type A*, *Type B* e *Type C*, diversi tipi di pattern quadrangolari, *Quad grids*, *Diamonds* e *Staggered quad*, ed il pattern esagonale, *Hexagon cells*, che a differenza dagli altri due, consente di distribuire una maglia costituita dai bordi di celle esagonali sghembe, ma non di porzioni di superfici, che siano esse piane o curve.

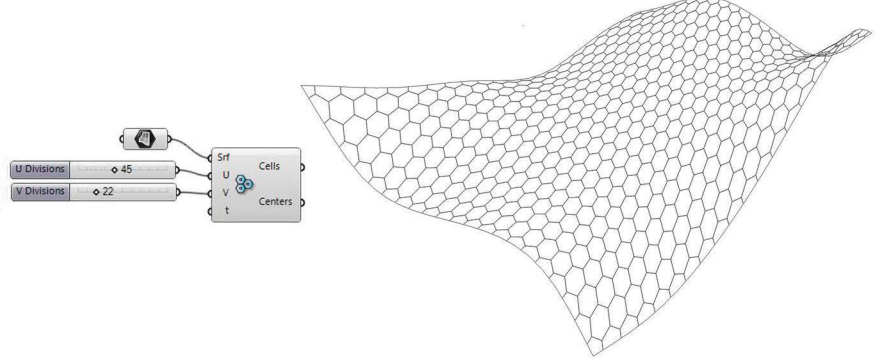
E' importante distinguere gli algoritmi che consentono la distribu-



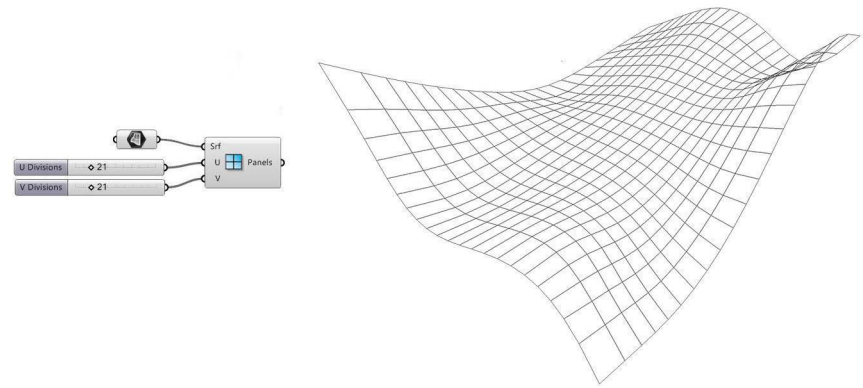
6.17 - Distribuzione del *pattern Triangle B*



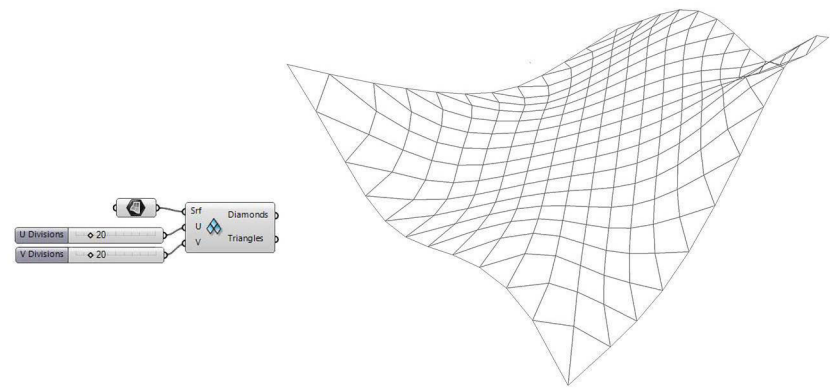
6.18 - Distribuzione del *pattern Triangle C*



6.19 - Distribuzione del *pattern Hexagon cells*



6.20 - Distribuzione del *pattern Quads*

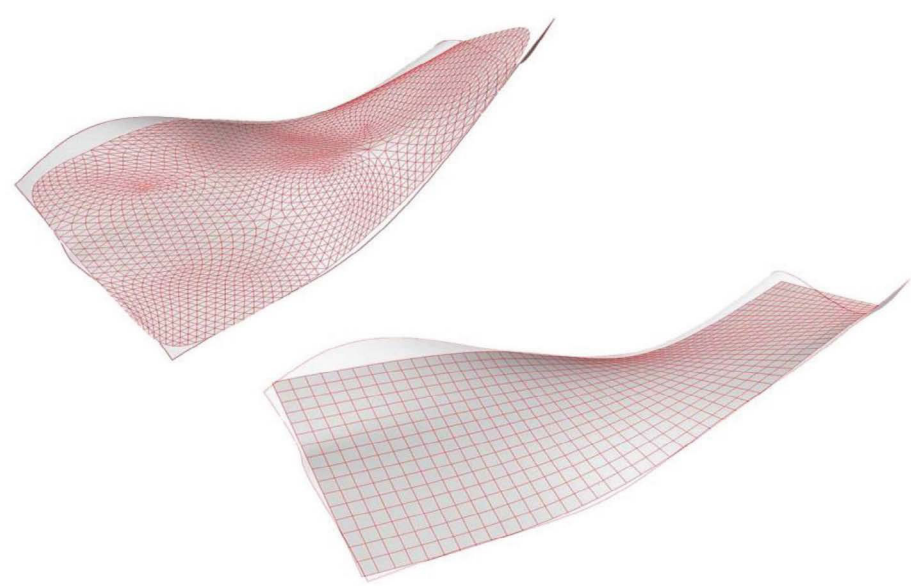


6.21 - Distribuzione del *pattern Diamondg*

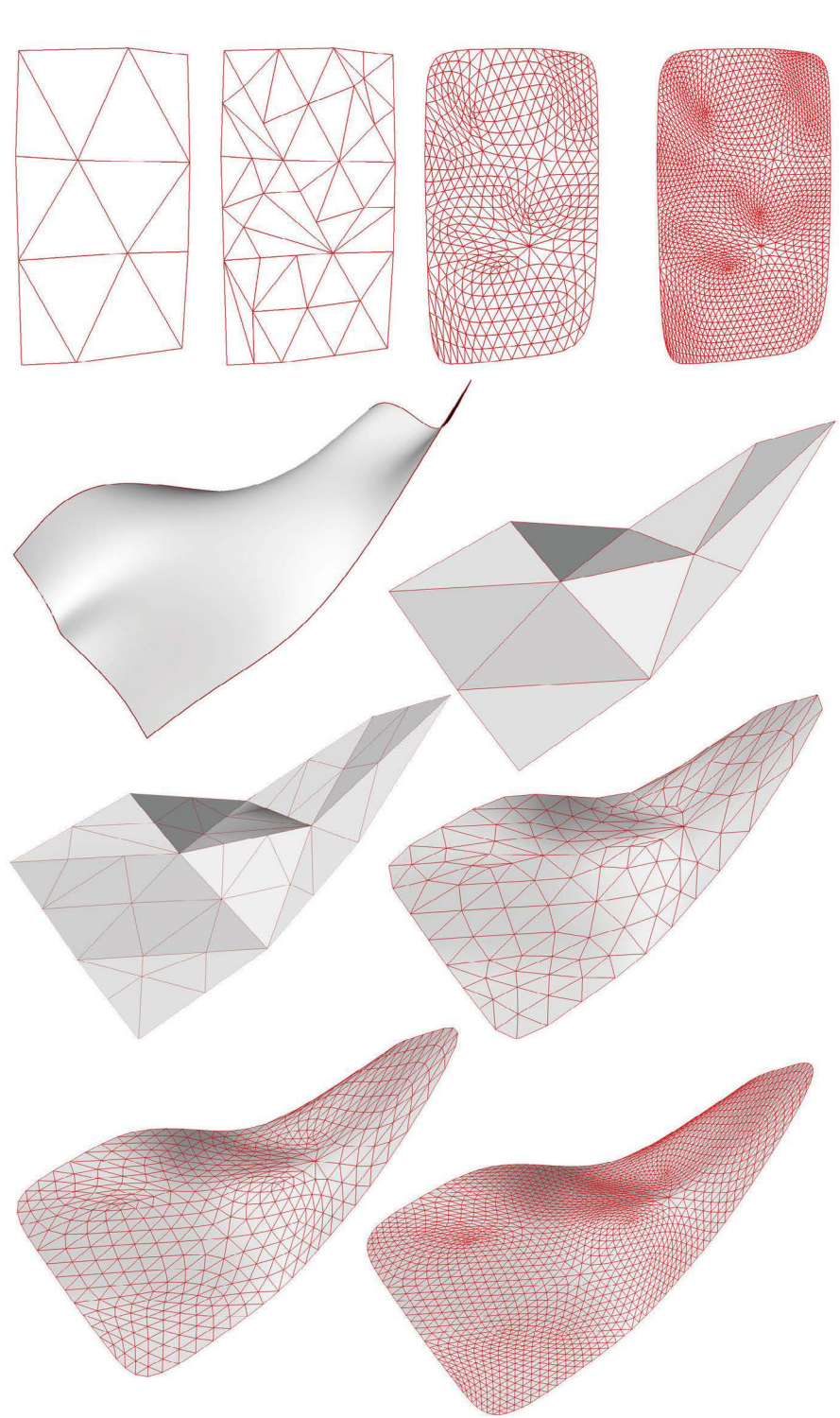
zione di celle e tasselli, da quelli che consentono la suddivisione iterativa degli elementi.
Il raffinamento delle *mesh* è il prodotto dell'applicazione reiterata di specifici algoritmi di suddivisione, a loro volta divisi in algoritmi approssimanti ed algoritmi interpolanti.
Grazie all'applicazione di tali algoritmi, una superficie poliedrica, o anche definita *coarse mesh*, o mesh grezza, tende ad una superficie limite: per questa ragione, essi vengono definiti anche approssimanti.³⁰
L'*add-on Weavebird* di *Grasshopper*, dispone di una serie di algoritmi che permettono di suddividere iterativamente i poligoni estratti, generando una griglia sempre più fitta che, nella condizione limite, tende ad una superficie continua.
Weavebird è un *topological mesh editor* creato da Giulio Piacentino nel 2009, ed in quanto tale contiene molti dei noti algoritmi di suddivisione e di trasformazione di maglie geometriche. E' possibile raggiungere risultati analoghi attraverso l'opzione *et_Subdivide* disponi-



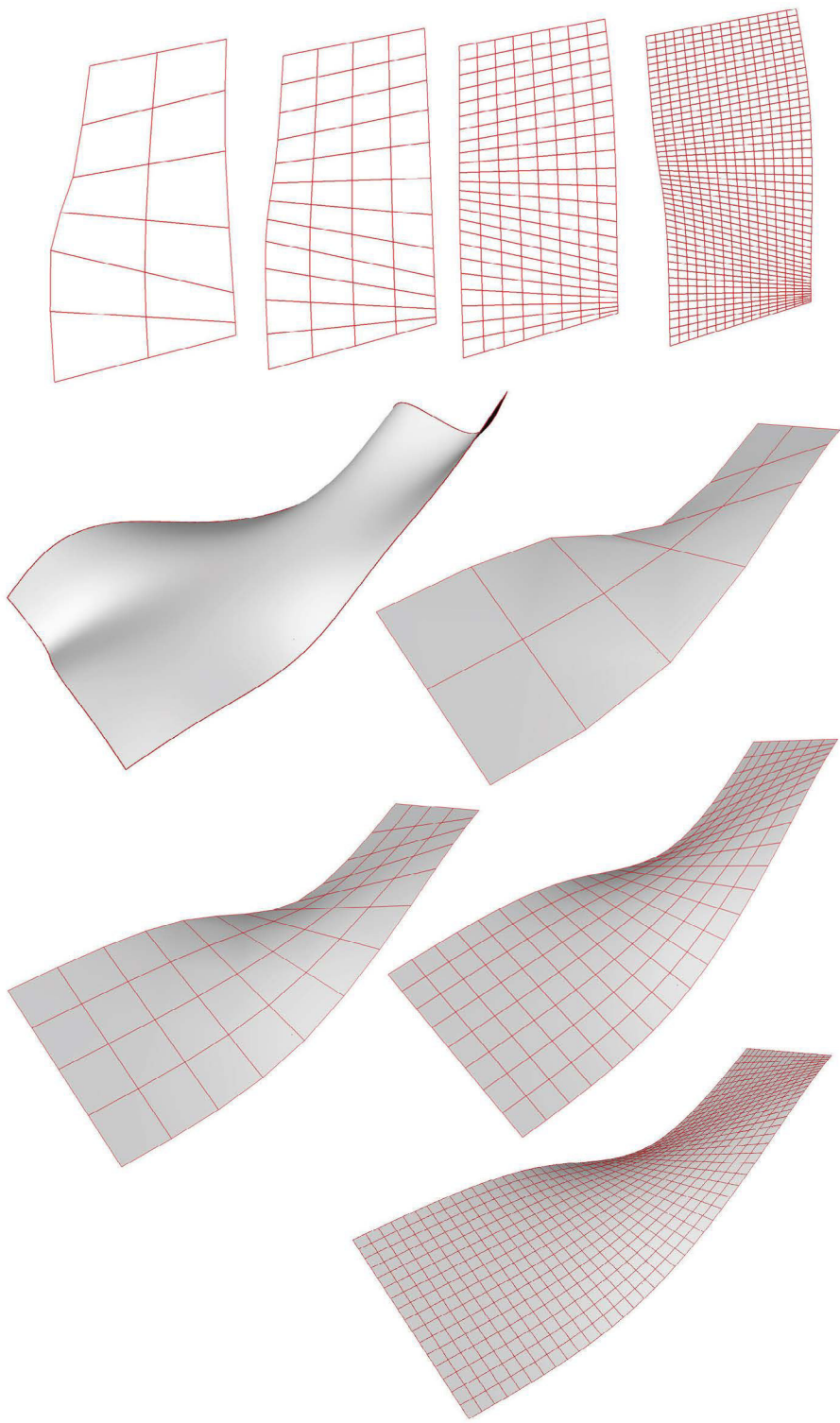
bile nel *plug-in Evolute Tools Pro*, sempre di *Rhino*.
Tra gli algoritmi che consentono il raggiungimento di tale scopo è possibile citare l'algoritmo di suddivisione *Catmull-Clark*.
Il cui nome deriva dai due matematici Edwin Catmull³¹ e Jim Clark, per la suddivisione dei bordi di celle quadrilatere, e l'algoritmo di suddivisione Loop, dal nome del matematico Charles Loop³² che ideò il primo schema di suddivisione per la suddivisione dei bordi di celle triangolari. Mediante l'algoritmo *Catmull-Clark*, ogni bordo della rete quadrangolare viene poi ulteriormente suddiviso in due parti, introducendo un nuovo bordo a partire dal punto medio dei bordi già esistenti. La rete risultante è sempre costituita da quadrilateri. (fig.6.24) Analogamente, la maglia risultante dall'applicazione ricorsiva dell'algoritmo di suddivisione *Loop* è sempre costituita da facce triangolari. (fig.6.23)



6.22 - Applicazione degli algoritmi di suddivisione *Loop* e *Catmull-Clark*



6.23 - la maglia risultante dall'applicazione ricorsiva dell'algoritmo di suddivisione *Loop* è sempre costituita da facce triangolari.



6.24 - Mediante l'algoritmo *Catmull-Clark*, ogni bordo della rete quadrangolare viene poi ulteriormente suddiviso in due parti, introducendo un nuovo bordo a partire dal punto medio dei bordi già esistenti.

Inoltre, tra gli algoritmi di suddivisione ad oggi disponibili, i *remeshing operators* rappresentano degli utili strumenti di ottimizzazione e di generazione di mesh duali.³³ Il termine dualità esprime un rapporto di complementarità e di dipendenza tra due tassellazioni: tra i *pattern* geometrici possono, dunque, esistere dei rapporti di dualità, è cioè possibile generare un pattern da un altro.

“Un reticolo duale è un reticolo che si ottiene congiungendo i centri dei poligoni di un reticolo dato. Mentre le aste di un reticolo definiscono la regione, quelle del suo reticolo duale ne definiscono la superficie per nodo.”³⁴

Per comprendere il significato geometrico dei rapporti di dualità, è possibile definire le tre diverse tipologie di regioni monoedrali scelte attraverso il simbolo di Schläi (n;m):

n rappresenta il numero dei lati di ciascuna faccia e m rappresenta la valenza dei vertici della rete.

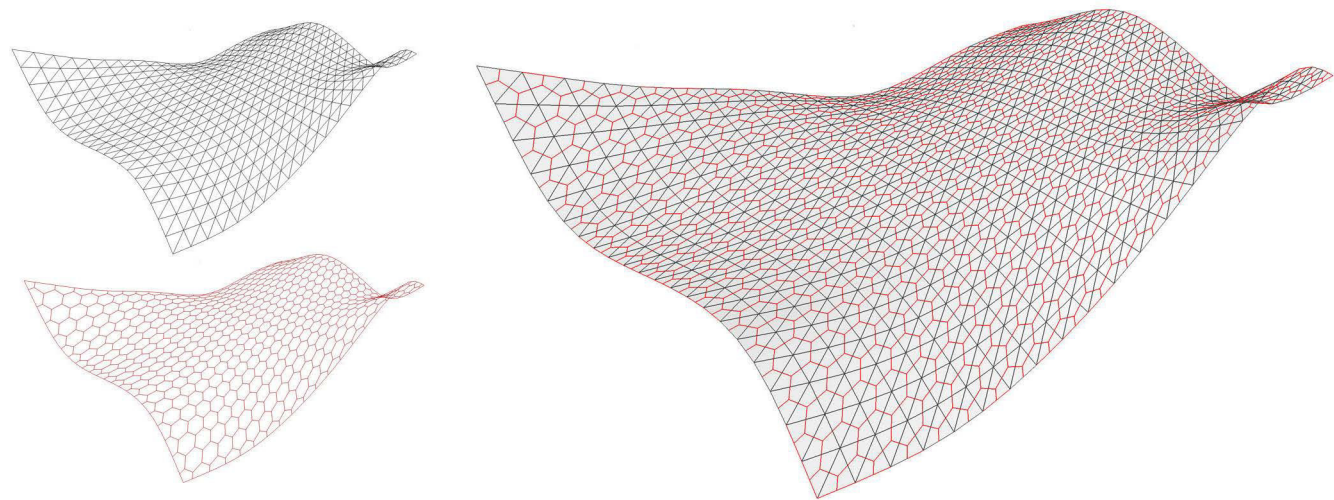
Pertanto, le tre regioni regolari sono esprimibili, secondo questo simbolo, come (3,6), (4,4) e (6,3):

Il simbolo (3; 6) rappresenta la tassellazione triangolare, il simbolo (4; 4) quella quadrilatera e il simbolo (6; 3) quella esagonale.

Da queste relazioni è possibile rilevare, in maniera immediata, il rapporto di dualità che intercorre tra le regioni (3; 6) e le regioni (6; 3), ovvero sussiste una corrispondenza biunivoca tra le facce dei triangoli della prima regione ed i vertici della seconda, e viceversa. Ne consegue, quindi, che la regione (4; 4) è autoduale.³⁵

Tra gli algoritmi duali, è possibile citare *Dual Boundary*, o “contorno duale”, del *plug-in Evolute Tools Pro* di *Rhino*. (fig. 6.25)

6.25 - Applicazione dell'algoritmo *Dual Boundary* (*Evolute Tools Pro*) su una *mesh* triangolare (*Lunch Box-pattern Triangle C*) e conseguente creazione del pattern esagonale duale.



Il terzo ed ultimo step riguarda la planarizzazione degli elementi sghembi distribuiti sulla superficie.

La planarizzazione di una superficie complessa con elementi piani esagonali e quadrilateri è geometricamente più difficile da gestire rispetto ai più immediati processi di triangolazione.

Infatti, non è immediato individuare un piano passante per un numero di punti pari a quattro o a sei, come invece sempre accade per tre punti comunque distribuiti nello spazio.

Nel caso delle superfici complesse, la planarizzazione delle celle di una mesh genera un'approssimazione formale tra la superficie di partenza ed il suo corrispondente sistema discreto, oltre che la deformazione degli elementi che compongono la tassellazione.

Ciò deriva dal fatto che, per rendere complanari un certo numero di punti distribuiti su una superficie complessa, è necessario “perturbare” gli stessi affinché essi si ridistribuiscono secondo una nuova condizione di equilibrio.

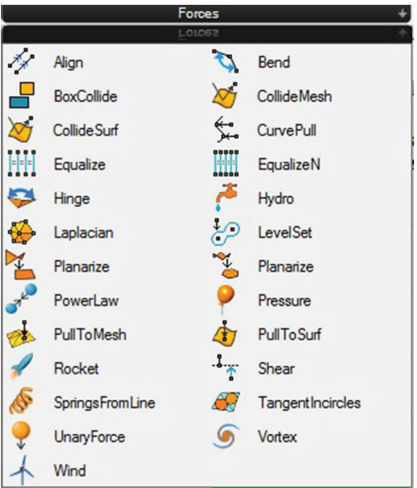
Richiamando quanto dimostrato nel precedente paragrafo, si ricorda che la somma degli angoli interni delle figure determina la planarità o meno dei tasselli: affinché ciò accada è necessario che tale somma sia pari a 360°. (fig.6.30)

Pertanto, il problema della planarizzazione rappresenta un processo iterativo di ottimizzazione. La soluzione open source, ad oggi disponibile, è rappresentata dal componente planarize, appartenente al sistema di forze fisiche virtuali dell'*add-on Kangaroo Physics* di *Grasshopper*.³⁶ (fig.6.26,27)

Kangaroo Physics è stato messo a punto da Daniel Piker nel 2011, ed è un motore virtuale che consente la simulazione interattiva di forze fisiche applicate alle geometrie di input.



Se unito all'*add-on Weavebird*, esso consente di discretizzare un sistema continuo in un sistema discreto elastico, composto da un numero finito di elementi puntuali mutuamente connessi attraverso degli elementi lineari elastici.



6.26 - Barra del *plug-in Kangaroo*.
6.27 - Pannello delle digital forces di *Kangaroo*.

Seguono le principali operazioni di base necessarie per la planarizzazione delle celle che compongono una mesh poligonale.

Data una geometria NURBS si procede alla sua discretizzazione in sotto-elementi, nello specifico in punti e segmenti se l'elemento di partenza è una curva, ed in punti e curve spezzate se l'elemento di partenza è una superficie: da ciò deriva automaticamente che le curve sono convertite in polilinee, mentre le superfici sono convertite in mesh. Il sistema discreto, attraverso l'apposito componente spring ("molla") viene trasformato in un sistema elastico.

Il comportamento elastico assunto dagli elementi di connessione è descritto dalla legge di Hooke,³⁷ per cui per ognuno di tali elementi –“molla” è possibile indicare la lunghezza di riposo iniziale ed impostare un valore di rigidità.³⁸ I materiali per i quali la legge di Hooke rappresenta un'utile approssimazione del comportamento reale sono detti materiali elastico-lineari. Il modello classico di elasticità lineare è la molla perfetta o ideale, cioè una molla priva di peso, di massa, in assenza di attrito e di altri fenomeni dissipativi.



E' interessante, ai fini della comprensione del funzionamento di tale componente, sottolineare che tale legge fu formulata nel 1675 da Robert Hooke, nella forma dell'anagramma latino “ceiinossttuw”, la cui soluzione fu pubblicata da Hooke nel 1678 come “*Ut tensio, sic vis*”, che significa “*come l'estensione, così la forza*”, cioè l'allungamento δ prodotto nella molla è direttamente proporzionale alla forza F impressa:³⁹

$$F=k \delta$$

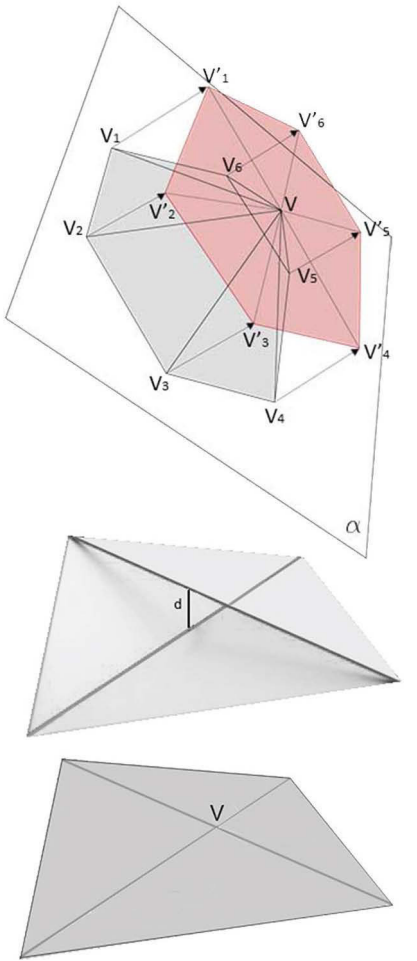
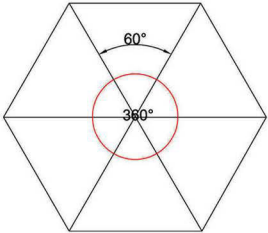
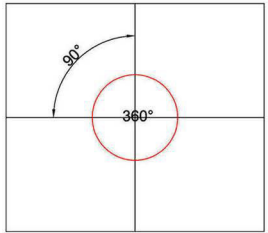
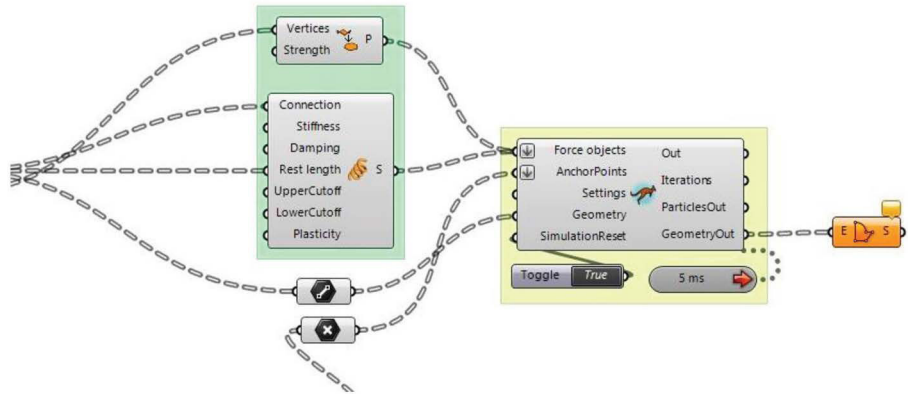
E' necessario ancorare il sistema da sottoporre alla simulazione attraverso l'individuazione di specifici *anchor point*, o punti di ancoraggio, appartenenti alla mesh estratta e che rimangono fissi durante la simulazione. Durante la simulazione (perturbazione), tutti i punti,

a meno di quelli vincolati, cambiano posizione in seguito all'azione della forza di planarizzazione che determina lo spostamento degli elementi.

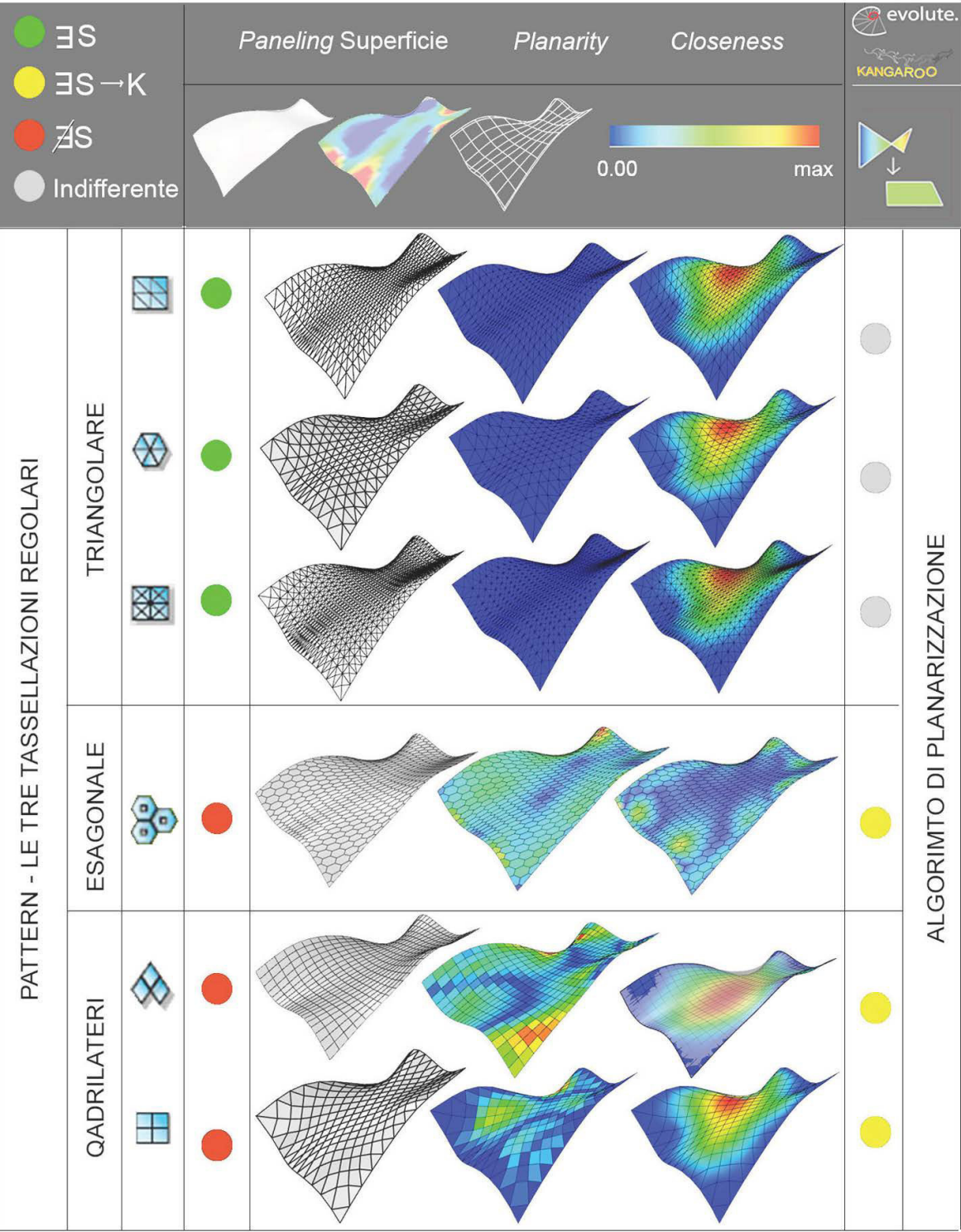
Kangaroo planarizza il bordo degli elementi distribuiti sulla superficie perturbando i vertici delle celle alla ricerca della somma, pari a 360°, degli angoli interni al poligono. (figg.6.30,32,33)

Pertanto, sono state eseguite delle prove applicando gli algoritmi di suddivisione e di planarizzazione forniti dai plug-in di Rhino Grasshopper (*Lunch Box*, *Kangaroo Physics*) ed *Evolute Tools Pro* (*et_Subdivide*, *et_Planarize*) su una superficie con una forte variazione di curvatura. Il plug-in *Evolute Tools Pro* (Rhino), consente l'utilizzo dell'opzione di ottimizzazione *et-Planarize*, grazie alla quale è possibile planarizzare gli esagoni sghembi distribuiti sulla superficie dall'algoritmo *Dual Boundary*, applicato alla mesh triangolare di partenza.

Le figure riportate nella tabella seguente (fig.6.34) mostrano il diverso grado di planarità e la deformazione dei pannelli esagonali dovuti alla variazione della curvatura della superficie e derivanti dagli step di planarizzazione.



6.28 - Sistema discreto elastico.
6.29 - Nel frammento di definizione (*Grasshopper*) è visibile il sistema di forze, le geometrie e gli *anchor point* in input nel motore di simulazione *Kangaroo*.
6.30 - Planarizzazione di un esagono sghembo.
6.31 - Quadrilatero sghembo. E' visibile la distanza tra le diagonali.
6.32 - Quadrilatero piano. Le diagonali sono incidenti.
6.33 - La somma degli angoli deve essere pari a 360°.



6.34 - Tabella riassuntiva dell'analisi della *closeness* e della *planarity* dei *pattern* indagati. I colori mostrano che le celle esagonali e quadrilatere sono sghembe.

I grafici mostrano la distribuzione dei pattern e la relativa analisi del grado di *planarity*, cioè della planarità di ogni singolo elemento, e della *closeness*, cioè della maggiore o minore distanza della mesh dalla superficie curva di riferimento. Questi due strumenti rappresentano un mezzo diagnostico utile per confrontare un sistema continuo con il corrispondente sistema discreto.

Il grado di planarità di un elemento viene misurato in base a due criteri: la massima differenza di angolo in gradi tra la somma dei quattro angoli interni di ciascun elemento e 2π (quindi tale differenza è pari a zero se gli elementi sono planari e convessi) e la distanza massima calcolata tra le diagonali delle facce.⁴⁰

Nello specifico, i grafici riportati in tabella, derivanti dall'applicazione del tool di analisi planarity, o planarità, di *Evolute Tools Pro*, esprime il grado di planarità di una faccia procedendo alla colorazione graduale dei tasselli dal colore rosso a quello blu: il primo colore indica una maggiore distanza tra le diagonali, mentre il secondo colore indica che tale distanza è nulla. (figg. 6.32,33,38)

E' possibile effettuare tale analisi anche utilizzando degli specifici componenti di *Grasshopper* realizzati *ad hoc*.⁴¹

Un altro strumento di analisi che è molto utile adoperare per controllare la qualità della tassellazione di una superficie è il grafico della *closeness*, letteralmente "vicinanza", attraverso cui è possibile mostrare il grado di approssimazione esistente, misurato calcolando la distanza tra i punti della superficie curva di riferimento ed i punti del sistema discreto computato: il passaggio dal colore blu al colore rosso indica l'aumento del valore legato al dato. (fig. 6.37). L'indagine delle proprietà di ciascuna delle tre tassellazioni indicate, unitamente alla trattazione degli algoritmi che ne consentono l'ottimizzazione, rappresentano uno degli scopi principali di questa ricerca.

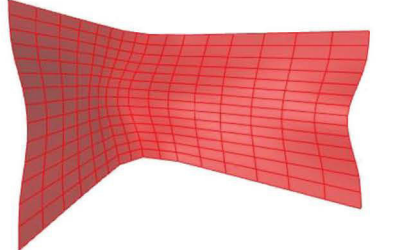
6.2.1 Pattern triangolare

In architettura, la pannellizzazione di superfici curve con elementi triangolari piani rappresenta la tecnica di discretizzazione più antica, ad oggi ancora ampiamente utilizzata.

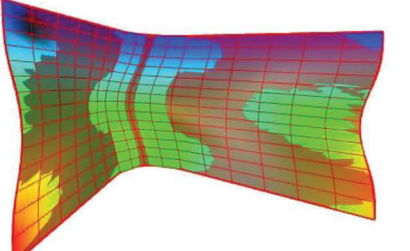
E' noto che per tre punti comunque distribuiti nello spazio è sempre possibile individuare un piano.



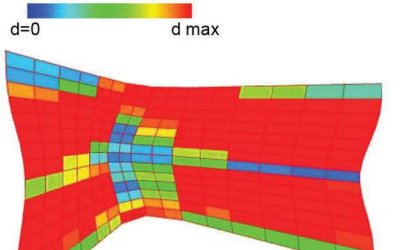
Reference Surface 6.35



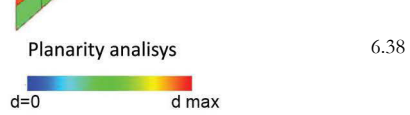
Catmull-Clark subdivision 6.36



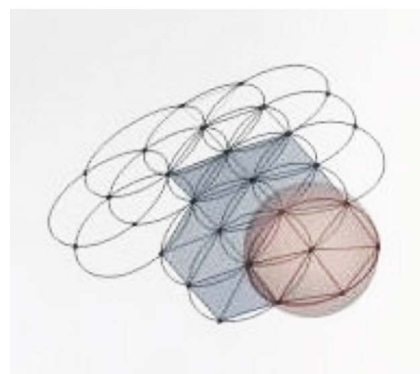
Closeness analysis 6.37



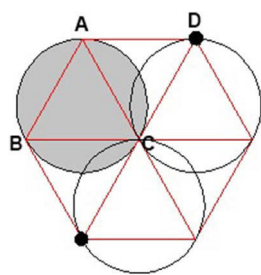
Planarity analysis 6.38



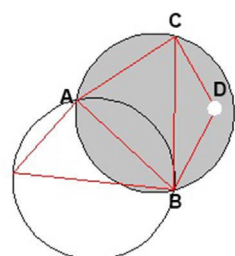
6.39 - Misurazione della planarity e della closeness di una mesh quadrangolare distribuita su una superficie a doppia curvatura variabile. E' evidente chequasi tutte le celle sono sghembe.



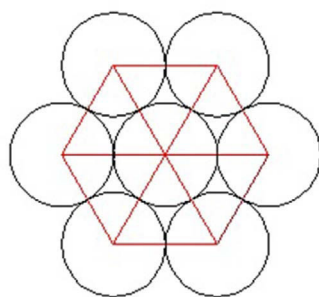
6.40



6.41



6.42



6.43

Il metodo più immediato è quello di suddividere le celle individuate dalle curve iso-parametriche di una superficie mediante il tracciamento delle diagonali. Inoltre, come mostrato, i citati *plug-in Paneling Tools* e *Lunch Box (Grasshopper)* di *Rhino* consentono di definire automaticamente la distribuzione diretta di tale pattern su qualsiasi tipo di superficie.

Pertanto, è interessante approfondire l'argomento soprattutto introducendo l'uso di specifici algoritmi impiegati per l'ottimizzazione delle *mesh* triangolari, indagandone la regolarità in funzione della curvatura delle superfici.

A tale scopo, appare utile ed opportuno citare il contributo *Discretizzazione delle superfici continue per mezzo di superfici poliedriche* di Leonardo Baglioni.⁴² Data una superficie complessa *s*, consideriamo un punto *P*, ad essa appartenente, e costruiamo una sfera avente centro in *P*. Una volta individuata la curva *c* di intersezione tra la sfera e la superficie, è possibile dividere la stessa in sei parti e tracciare i sei raggi ottenuti congiungendo i punti individuati sulla curva con il centro della sfera stessa. Si ottengono così sei triangoli equilateri, ed iterando il processo per tutti i vertici dei triangoli progressivamente individuati si ottiene la suddivisione della superficie in elementi regolari. (fig.6.40) Tuttavia, la dimostrazione viene conclusa affermando che, attraverso tale processo, “*comunque la discretizzazione è strettamente legata alle caratteristiche geometriche della superficie di origine.*”⁴³

Infatti, come anticipato nel paragrafo precedente, nonostante l'alta flessibilità di questo pattern, esistono delle precise condizioni geometriche che hanno una notevole influenza sulla creazione delle maglie triangolari. Ad esempio, la presenza di punti di singolarità sulla superficie di input determina la variazione della valenza dei vertici, o nodi, appartenenti ad una triangolazione e coincidenti con quegli stessi punti, la quale pertanto assume un valore maggiore o minore di sei. Lo svantaggio è notevole, soprattutto se tale *mesh* rappresenta la base per effettuare una successiva tassellazione esagonale della superficie⁴⁴

Affinché gli elementi triangolari che compongono la *mesh* siano tutti uguali tra loro ed uniformemente distribuiti, è necessaria l'applicazione di algoritmi in grado di veicolare tale regolarità.

A tale scopo, il *criterio di Delunay*, rappresenta il principio matematico generale più sfruttato in fase di *remeshing* per ottimizzare una *mesh*

triangolare che presenta una bassa regolarità della distribuzione e della geometria degli elementi che la compongono.⁴⁵

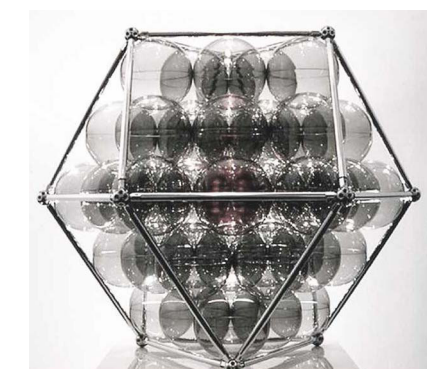
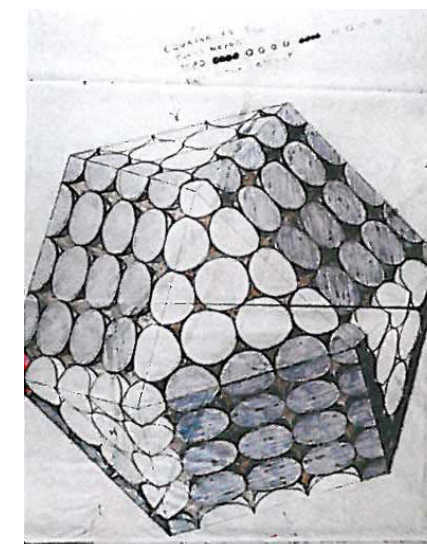
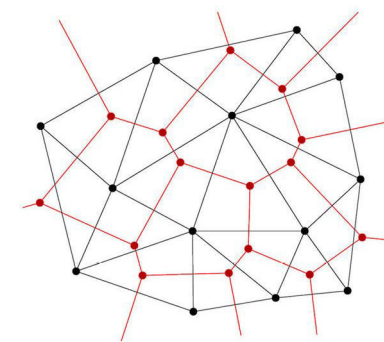
Secondo il *criterio di Delunay*, dato un insieme di triangoli, possiamo inscrivere un qualsiasi elemento triangolare ABC in una circonferenza, ma ogni punto D dei triangoli adiacenti che hanno almeno un segmento in comune con il triangolo ABC, deve essere esterno alla circonferenza in oggetto⁴⁶ (fig.6.41). Le figure mostrano una condizione per la quale il criterio di Delunay è rispettato e una condizione in cui lo stesso non è soddisfatto. (6.42)

La condizione perfetta è verificata nel momento in cui le circonferenze con centro nei vertici dei triangoli sono mutuamente tangenti. Si osservi che questa distribuzione consente di individuare in maniera diretta, raccogliendo i gruppi di sei triangoli aventi un unico vertice in comune, il profilo perimetrale di un esagono convesso (6.43). La triangolazione di Delunay, inoltre, è duale del diagramma di Voronoi (fig.6.44), una tra le tassellazioni più importanti di reticoli non regolari diffuse in natura, che prende il nome dal matematico russo George Voronoi.⁴⁷

A partire dagli anni '80, grazie agli studiosi Charles Lawson e Dave Watson, tale criterio è stato utilizzato per ottimizzare la triangolazione di vertici distribuiti nello spazio.

Analogamente a quanto accade nel piano, affinché una triangolazione segua il principio di Delunay, ogni vertice o nodo della maglia triangolare, in seguito all'ottimizzazione, non dovrà essere contenuto all'interno di una sfera circoscritta all'elemento triangolare adiacente.⁴⁸ Per comprendere il processo di ottimizzazione di una maglia triangolare basato sulla distribuzione di sfere su una superficie, è doveroso richiamare la configurazione *DYMAXION*, da *Dynamic Maximum Tension*, legata alle relazioni sinergiche e principale oggetto di studio di Fuller. Mediante tale configurazione il raggiungimento delle condizioni di equilibrio è reso possibile grazie ad una distribuzione densa e compatta di sfere, nota come *close packing* o impacchettamento (fig.6.46). Tale distribuzione è tipica delle strutture atomiche:

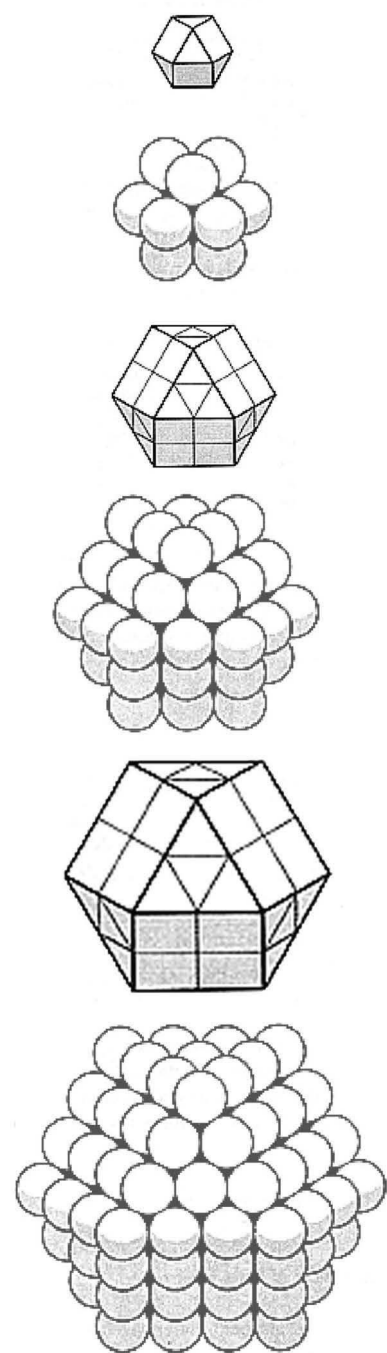
“*quando le sfere vengono accostate nel modo più denso attorno ad un nucleo centrale, compaiono delle regolarità strutturali. La disposizione di sfere aventi lo stesso raggio e mutuamente tangenti attorno ad un vuoto centrale coincide prima con l'icosaedro, poi con l'ottaedro ed infine con il tetraedro, cioè con i poliedri*



6.44 - Diagramma di Voronoi.

6.45 - R.B.Fuller, *Dymaxion*.

6.46 - R.B.Fuller, *Closest Packing of Spheres*, 1980.



6.47 - R. B. Fuller, *Omnidirectional Closest Packing of Spheres*.

regolari costituiti da sole facce piane equilatera.”⁴⁹

Richiamando i principi teorici introdotti, per comprendere in che modo questi algoritmi ottimizzano una mesh triangolare, è significativo esplicitare la condizione per cui i triangoli che compongono tale maglia siano legati a sfere distribuite in maniera tale da essere il più possibile mutuamente tangenti ed uguali tra loro.

L'algoritmo di ottimizzazione *Ball Packing*,⁵⁰ la cui applicazione è resa disponibile da *Evolute Tools Pro*, (*Rhino*), attraverso successive operazioni di ottimizzazione, tende a regolarizzare una *mesh* a maglia triangolare: i singoli triangoli tenderanno ad essere il più possibile equilateri. L'algoritmo mira a computare la creazione di sfere con centro nei vertici della maglia triangolare di partenza.

Tendere ad un modello perfetto di *Sphere Packing* significa imporre che la distanza tra tali sfere diminuisca sempre di più, fino ad annullarsi: le sfere diventeranno così mutuamente tangenti.

Si ritiene utile, per comprendere meglio il funzionamento di tale algoritmo, indagare cosa accade alla base di un processo di *Circle Packing*, il quale consente la discretizzazione di una superficie complessa in una mesh composta da facce circolari piane tangenti.

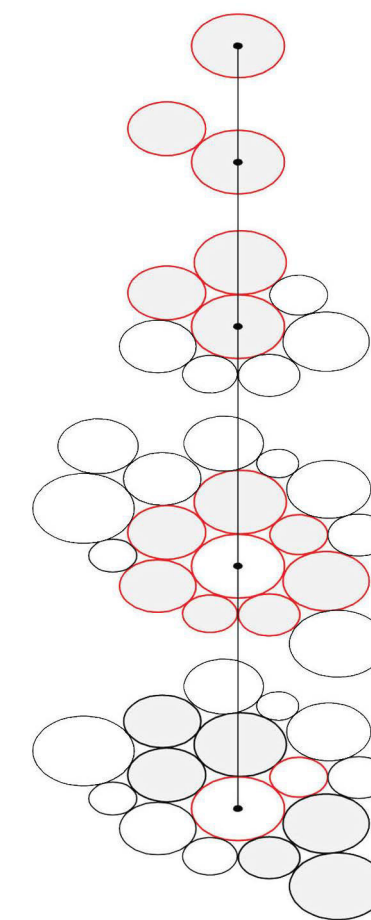
L'algoritmo ottimizza la geometria e la distribuzione dei triangoli che compongono la maglia di partenza, di cui i vertici rappresentano i centri delle circonferenze. Attraverso l'ottimizzazione della distribuzione dei cerchi sulla superficie è automaticamente possibile migliorare la distribuzione dei triangoli di partenza, in maniera che essa tenda al criterio di Delunay. Gli studi condotti da Mathias Hobinger, e raccolte nella sua ricerca *Packing circles and spheres on surfaces*,⁵¹ realizzata in collaborazione con il prof. Helmut Pottmann, risultano utili per la comprensione del processo.

Il *Circle Packing*, anche noto come *Koebe–Andreiev–Thurston theorem*, è stato introdotto, nel 1930, da Paul Koebe, matematico tedesco del XX secolo, che ne dimostrò l'esistenza per la sfera e per il piano.⁵² William Paul Thurston,⁵³ matematico statunitense e E.M. Andreiev ne ripresero le ricerche nel 1970. Nel 1985, Thurston definì il *Circle packing* individuando le relazioni gerarchiche che ne determinano la struttura, le quali sono basate su delle continue relazioni di tangenza. Il modello del *Circle Packing* si basa sull'individuazione di triple di cerchi tangenti: ogni tripla formerà un interstizio triangolare curvilineo. Le triple sono, a loro volta, collegate tra di loro da coppie di cerchi,

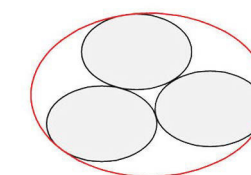
e ciò consente la distribuzione del *pattern*. I cerchi che compongono una tripla sono definiti “petali”, e la tripla, a sua volta, è definita “fiore”. Il grado definitivo di un cerchio sarà pertanto dato dal numero dei petali del fiore di cui esso rappresenta il centro. Per i cerchi posti sul bordo di una superficie non è, dunque, possibile completare il fiore. (fig.6.48)

Quindi, una configurazione di cerchi tangenti può esser considerata una struttura di tipo *Circle Packing* se, e solo se, ogni cerchio che gli appartiene è dotato di petali. Se i raggi di tre cerchi tangenti sono uguali tra loro lo spazio triangolato, i cui vertici rappresentano il centro delle sfere, sarà contenuto in un unico grande cerchio esterno (6.49). Un *Circle Packing* è, inoltre, localmente definito monovalente se le facce composte dal fiore di ogni cerchio non sono sovrapposte. Dunque, appare ora più immediato e semplice definire una triangolazione attraverso la considerazione della sua controparte circolare: ogni vertice rappresenta il centro di un cerchio, ogni bordo tra i vertici rappresenta un segmento tangente tra due cerchi e ogni faccia rappresenta una tripla di cerchi.⁵⁴ Affinché l'algoritmo possa distribuire dei cerchi, o delle sfere, che siano mutuamente tangenti, o che tendano a tale condizione, è necessario il ricorso alla regola matematica dei coseni.⁵⁵ La regola determina una ridistribuzione dei triangoli calcolando, volta per volta, la posizione, in termini di mutua distanza, delle sfere: ciò risulta particolarmente utile nei casi di superfici complesse, per le quali la distribuzione di triangoli equilateri è particolarmente difficile da raggiungere.⁵⁶ L'algoritmo inserisce un cerchio in un punto arbitrario e procede con la distribuzione dei restanti cerchi. Il tipo e la qualità della triangolazione di partenza influisce sull'ottimizzazione del risultato.⁵⁷

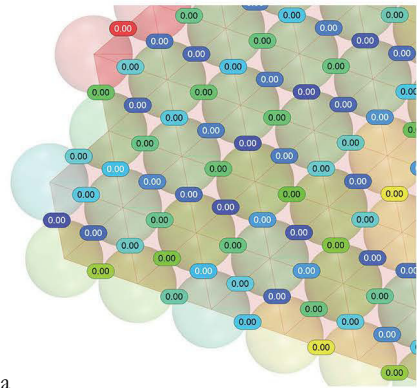
Nel passaggio dal *Circle Packing* allo *Sphere Packing*, o *Ball Packing*, la bidimensionalità delle circonferenze distribuite sulla superficie e legate alla maglia triangolare cede il passo alla tridimensionalità delle sfere mantenendo inalterati i principi di base. Le teorie consolidate su tale processo, e le sperimentazioni condotte all'interno di questo studio, indicano che il *Ball Packing* raggiunge buoni risultati sul piano e sulla sfera, ma soluzioni incomplete per quanto riguarda le superfici di tipo *free form*. La presenza di bordi, l'imposizione di vincoli e la variazione della curvatura impedisce la ridistribuzione regolare dei triangoli sulla superficie comportano la creazione di sfere per le



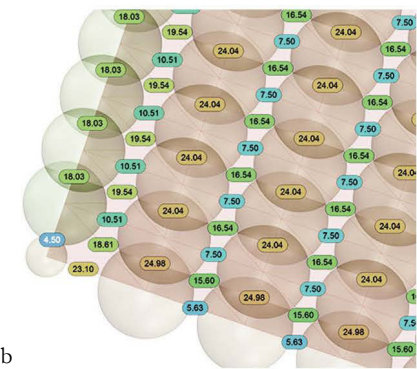
6.48



6.49

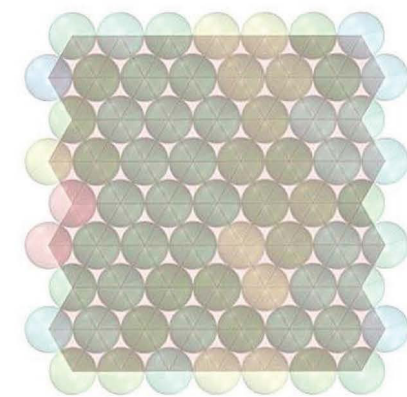
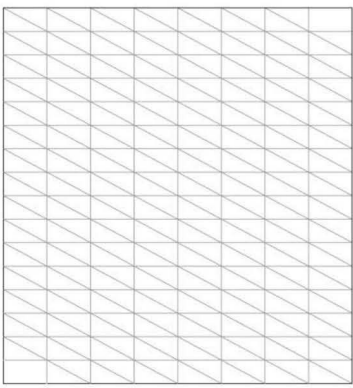
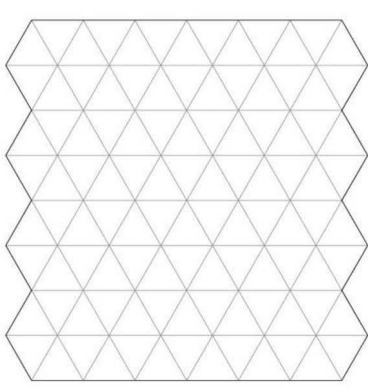


a

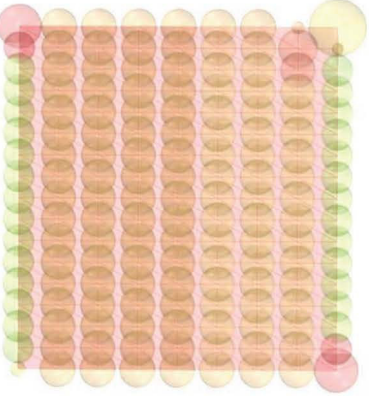


b

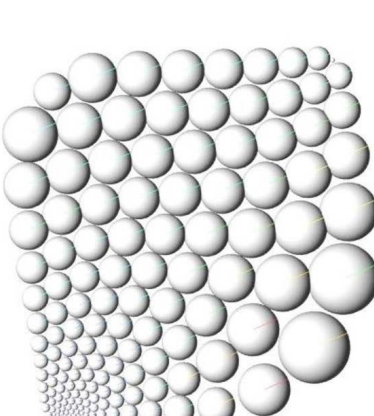
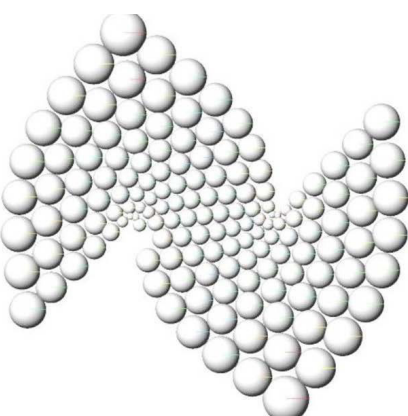
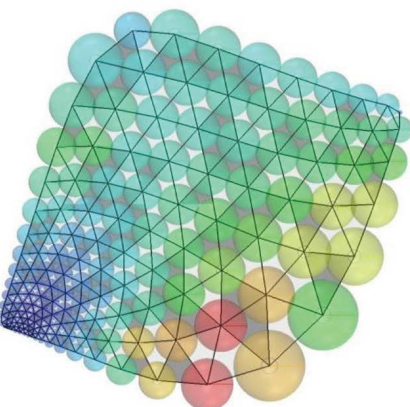
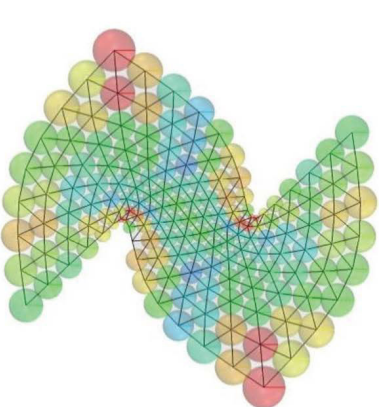
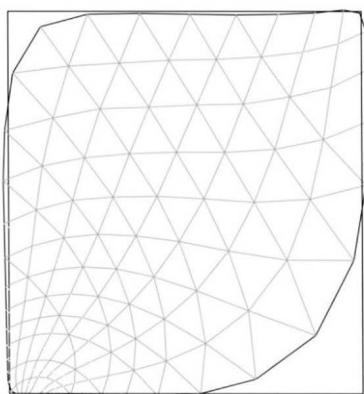
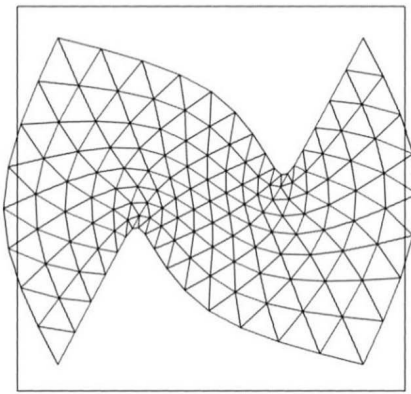
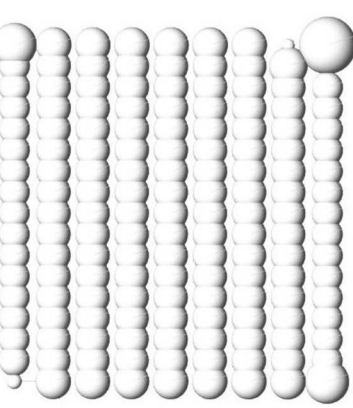
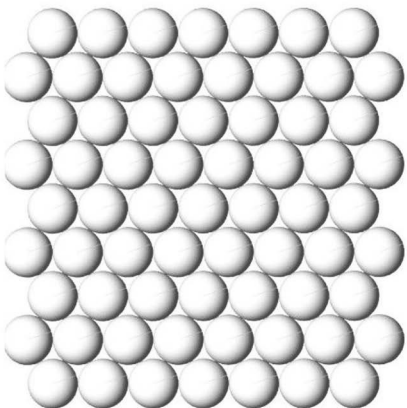
6.50 - a. L'algoritmo *Ball Packing (Evolute Tools Pro)* consente di visualizzare la distribuzione delle sfere corrispondenti alla triangolazione distribuita sulla superficie. La rispondenza del pattern triangolare al criterio di Delunay è dimostrata dalla mutua tangenza di tutte le sfere.
b. Nel caso di una triangolazione ottenuta raccaindo le diagonali di celle quadrilateri le sfere non sono mutuamente tangenti il raggio subisce maggiori deformazioni in corrispondenza degli spigoli.



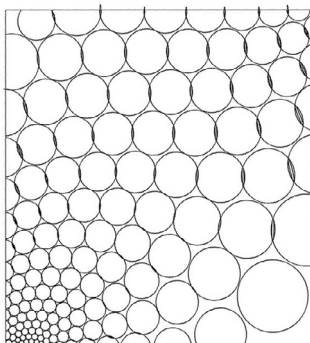
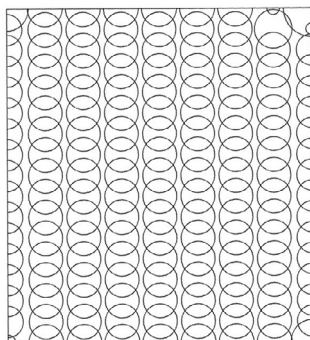
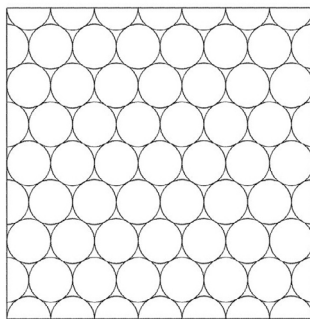
a



b

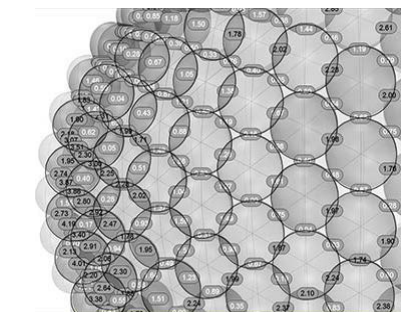


6.51 - Successione degli steps di ottimizzazione della *mesh* triangolare in fig. 6.50b. E' necessario imporre le condizioni di vincolo affinché la *mesh*, in seguito all'ottimizzazione del *pattern* non si distacchi eccessivamente dalla superficie di riferimento. Si ricorda che un processo di ottimizzazione, in quanto tale, non raggiunge necessariamente una soluzione definitiva, ma tende progressivamente alla migliore soluzione possibile.



6.52 - Le circonferenze intersezione tra le sfere e la superficie piana mostrano il livello di ottimizzazione del *pattern*: le sfere tendono ad essere mutuamente tangenti.

6.53 - Applicazione dell'algoritmo su una superficie curva. La *mesh* subisce delle trasformazioni.



quali la condizione di tangenza è difficilmente raggiungibile, come dimostrato soprattutto lungo i bordi. Sono state effettuate una serie di prove di applicazione dell'algoritmo *Ball Packing* eseguite su due tipi di triangolazioni differenti, distribuite su una superficie piana e su una superficie a doppia curvatura, entrambe soggette a diverse condizioni di vincolo. Nel primo caso, l'algoritmo è stato applicato su una *mesh* triangolare la cui distribuzione segue il criterio di Delunay (fig.6.50a). Nel secondo caso, si procede alla suddivisione della superficie in quadrilateri mediante l'applicazione dell'algoritmo *Catmull-Clark* e le celle vengono ulteriormente suddivise tracciandone le diagonali (fig.6.50b): ciascuno degli elementi sarà suddiviso in due elementi triangolari.⁵⁸

Nel primo caso, è possibile osservare che le sfere visualizzate dal software sono mutuamente tangenti, e non necessitano di ulteriori steps di ottimizzazione.

Anche nel caso di una superficie a doppia curvatura l'applicazione dell'algoritmo ha comportato la necessità di imporre delle condizioni di vincolo, (punti e bordi della superficie o aderenza alla superficie) collegando la *mesh* alla superficie di partenza che, pertanto, viene definita con il termine *reference surface*:

come mostrato dalle figure, le sfere tendono ad una condizione di mutua tangenza. (fig.6.53)

Per ottimizzare la *mesh* triangolare in maniera tale che, anche successivamente agli step di ottimizzazione, essa assecondi il più fedelmente possibile la superficie curva di origine è necessario sperimentare diversi valori, scelti arbitrariamente in base all'osservazione dei risultati ricavati, per il controllo della *closeness curvature*, cioè del parametro che indica la corrispondenza, o vicinanza, tra la *mesh* e la superficie di riferimento.

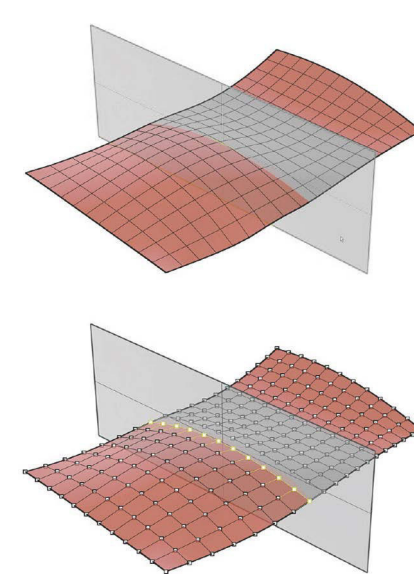
Le deformazioni subite dalle *mesh* di partenza in seguito all'ottimizzazione

suggeriscono la possibilità di lavorare con delle maglie di input di dimensioni superiori rispetto a quelle delimitate dai bordi della superficie che si intende suddividere, in maniera tale che le porzioni di *mesh* in eccesso possano assorbire, nella ricerca di regolarità degli elementi triangolari, le deformazioni della maglia stessa.

Ciò impedisce la perdita di controllo del risultato formale finale e della coerenza progettuale, in quanto le lunghezze di partenza dei bordi della rete sono gestite preventivamente dal progettista in funzione della variazione che subiranno.⁵⁹

Inoltre, l'ottimizzazione di una tassellazione, indipendentemente dal pattern scelto, grazie ai tools attualmente disponibili, può essere gestita lavorando sulla ricerca della complanarità, o allineamento, dei vertici distribuiti lungo una stessa curva, o polilinea, della maglia.

In fase progettuale, ad esempio, è utile ricercare questa condizione lungo i solai di calpestio posti alle diverse quote di un manufatto architettonico. Il *plug-in Evolute Tools Pro*, (*Rhino*) consente, attraverso il comando *Coplanarity*, di distribuire i vertici delle maglie in maniera che essi siano complanari (fig.6.54).



6.54

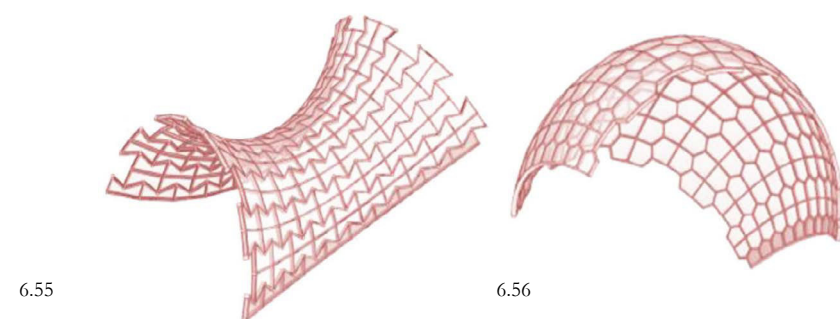
6.2.2 Pattern esagonale

Le *mesh* esagonali, o *Hexagonal Mesh*, costituiscono uno schema di suddivisione innovativo, ancora poco sfruttato, eppure indubbiamente dotato di una considerevole quantità di ottime proprietà dal punto di vista strutturale, costruttivo ed estetico.⁶⁰

Le *mesh* esagonali sono più flessibili ed hanno migliori proprietà di approssimazione di una data superficie rispetto alle tassellazioni triangolari e quadrangolari.⁶¹ La diffusione in natura del *pattern* esagonale dimostra che esso è anche particolarmente stabile dal punto di vista strutturale. Queste sono le motivazioni che, in questi ultimi anni, spingono gli studi verso la ricerca di una soluzione per la discretizzazione di superfici complesse attraverso l'uso di *pattern* esagonali. Gli edifici le cui strutture presentano questo tipo di pattern sono chiamati "fullereni" (fig.6.55), denominazione derivante dalla chimica e che denota un gruppo di molecole di carbonio.⁶³

La regolarità geometrica del tassello esagonale, come anticipato, dipende strettamente dalla curvatura gaussiana della superficie su cui il

pattern viene distribuito, infatti, risulta che:
se la curvatura gaussiana è positiva, l'esagono piano sarà convesso (fig.6.56);
se la curvatura gaussiana è negativa l'esagono sarà concavo, ed assumerà una conformazione "a farfalla" (fig.6.55);
infine, se la curvatura gaussiana è nulla, ovvero la superficie è rigata e sviluppabile, l'esagono degenera in un rettangolo (fig.6.62).



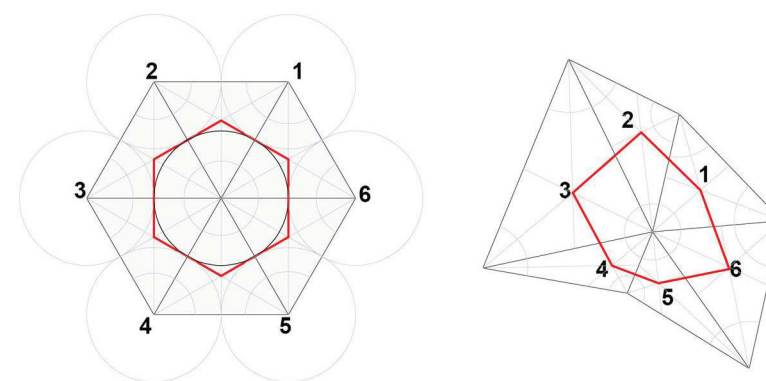
6.55

6.56

Quindi, su una superficie con variazioni di curvatura sarà possibile ottenere contemporaneamente pannelli esagonali concavi e convessi. Gli algoritmi per la distribuzione di pattern esagonali sfruttano la relazione di dualità con il pattern triangolare.

Ad esempio, nel caso specifico del *plug-in Evolute Tools Pro*, come anticipato, per distribuire una griglia di celle esagonali è necessario partire dalla creazione di una mesh a maglia triangolare.⁶⁴

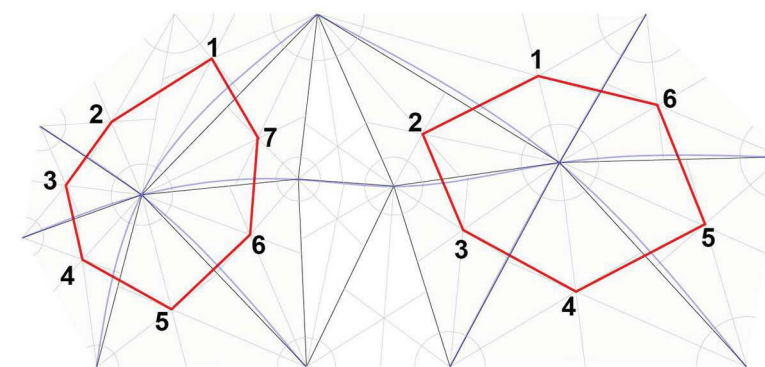
E' possibile dimostrare (cfr. par. 6.2.1) che gli elementi che compongono il *pattern* esagonale duale di una mesh triangolare strutturata seguendo il criterio di Delunay, presentano una maggiore regolarità formale⁶⁵ (fig.6.57). Pertanto, ottimizzata la *mesh* triangolare, è necessario ricorrere all'uso di un algoritmo di suddivisione duale, ad esempio *Dual Boundary*, di *Evolute Tools Pro*. E' importante ricordare che la forma delle celle esagonali distribuite sulla superficie appare geometricamente regolare fino a quando esse sono ancora sghembe: i lati dell'esagono sono curvi e individuano una porzione di superficie a doppia curvatura. Se si considerano sei triangoli adiacenti tra di loro, e di ciascuno di essi si individua il baricentro, per la relazione di dualità esistente tra la maglia triangolare e quella esagonale, tali punti rappresenteranno i vertici di ciascuna delle celle esagonali.⁶⁶



6.57

Come anticipato, se la *mesh* triangolare di partenza è estratta a partire dalla rete di linee di curvatura è importante che la superficie non presenti punti di singolarità, i quali causano una variazione della valenza del nodo della maglia in quel punto ($m \neq 6$: ne consegue che i tasselli duali non saranno esagonali, ma presenteranno un numero di lati maggiore o minore di sei influenzando inevitabilmente la regolarità della maglia di output e quindi il grado di ottimizzazione del risultato complessivo. (fig.6.58)

A tale proposito, sono stati sperimentati degli algoritmi di parametrizzazione globale della superficie, tra cui *Hexagonal global parameteri-*



6.58

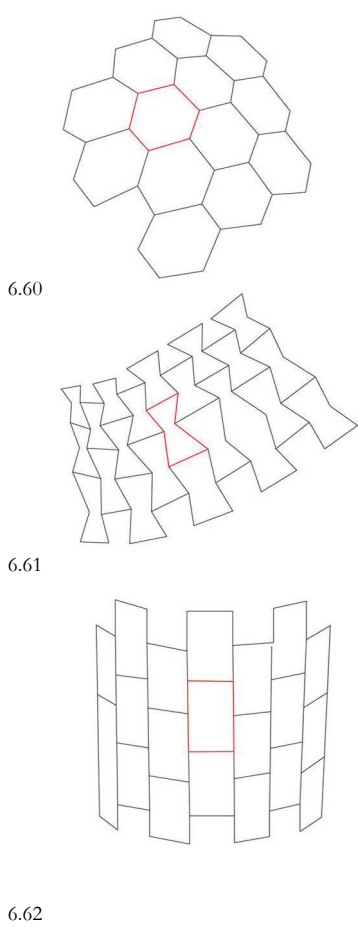
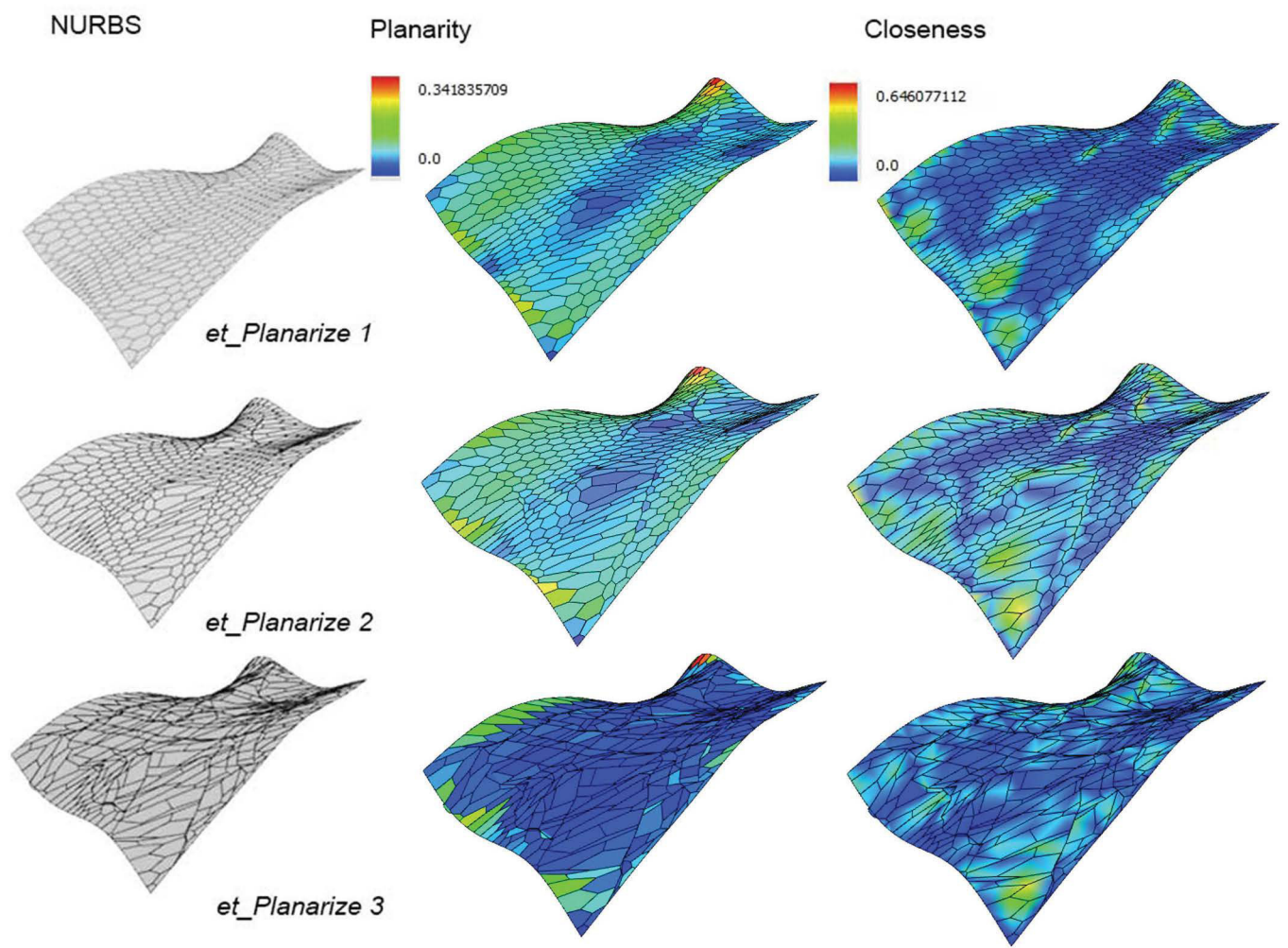
zation, che attraverso delle operazioni di remeshing, mira a controllare in maniera automatica la triangolazione della superficie, riducendo il numero dei punti di singolarità posti a distanza ravvicinata.

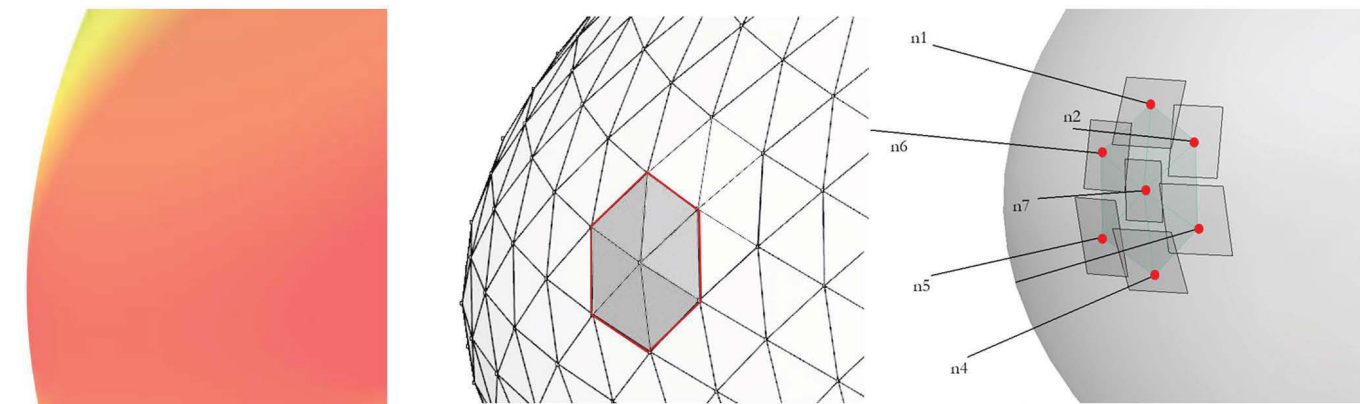
L'algoritmo esegue un'operazione di *clustering*, o raggruppamento, dei punti di singolarità, e mira a ridurre il numero di partenza: i punti tenderanno ad unificarsi, quando possibile, in un unico punto di

singularità, riducendo la presenza di tasselli irregolari.⁶⁷ Per raggiungere la planarità di ciascuno degli elementi esagonali, l'algoritmo "perturba" i vertici delle celle alla ricerca della condizione di equilibrio tale che la somma degli angoli al centro dei sei triangoli attraverso cui è possibile suddividere ciascuno degli esagoni sia pari a 360° , riproponendo quindi la condizione geometrica per cui la somma degli angoli interni di un esagono piano è pari a 2π . L'esistenza e la qualità del risultato sono legati alla curvatura della superficie. Un altro algoritmo di planarizzazione la cui descrizione è estremamente utile per comprendere le cause della deformazione degli ele-

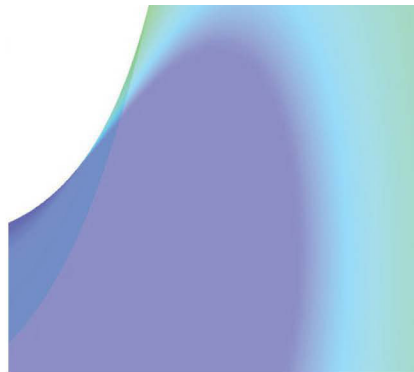
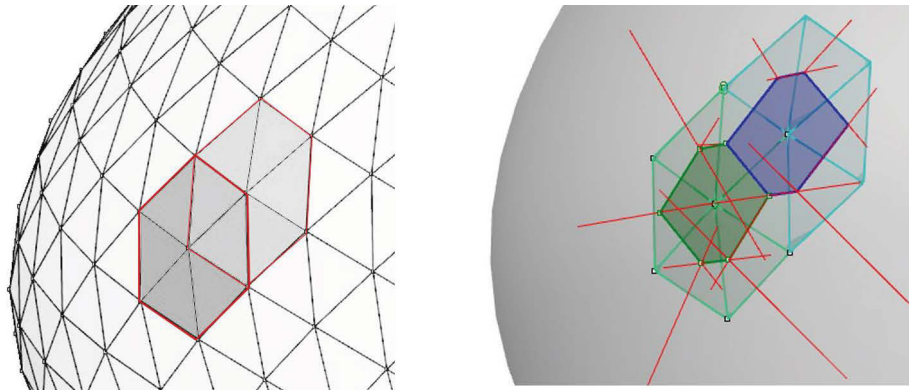
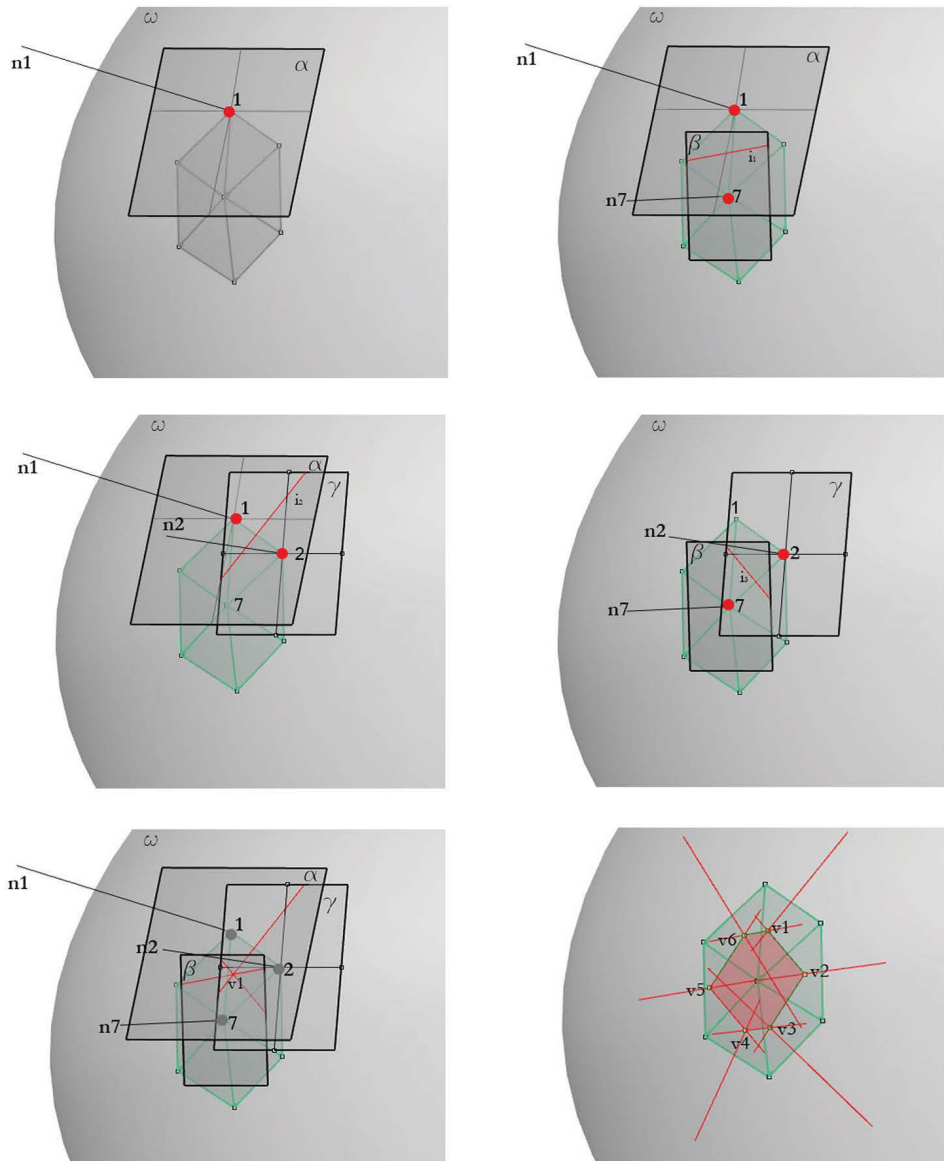
menti esagonali in funzione della curvatura della superficie è l'algoritmo *Tangent Plane Intersection*, meglio noto come metodo *TPI*. Nel 2008, Christian Troche, presentò un metodo, denominato *Planar Hexagonal Meshes by Tangent Plane Intersection*,⁶⁸ per ottenere la distribuzione di maglie esagonali piane, basato sulle reciproche intersezioni di piani tangenti alla superficie di cui si vuole eseguire la tassellazione, da cui il nome Metodo dei Piani Tangenti. La forma degli esagoni dipende dal tipo di intersezione dei piani tangenti e la superficie stessa. Se, infatti, i piani tangenti la sono tali da non intersecare la superficie, allora sarà possibile ottenere un pattern composto da pannelli esagonali piani convessi, che richiamano la più nota e regolare struttura a "nido d'ape": ciò accade nei casi in cui la curvatura gaussiana è positiva⁶⁹ (fig.6.60). Se, al contrario, la curvatura gaussiana è negativa, i piani tangenti intersecheranno la superficie, e ciò determinerà la distribuzione di elementi planari esagonali a "forma di farfalla" (fig.6.61): i singoli elementi piani presenteranno comunque un numero di lati pari a sei, ma perderanno la tipica, riconoscibile conformazione "a nido d'ape". Le figure seguenti descrivono i principi geometrici alla base dell'algoritmo *TPI*. Data una *mesh* triangolare, per ciascuno dei vertici della triangolazione è necessario individuare un piano tangente la superficie continua da cui tale mesh è stata estratta. Individuate sei facce triangolari, è necessario tracciare le normali alla superficie dai vertici dei sei triangoli e dal vertice al centro. L'intersezione dei tre piani passanti per i tre vertici del triangolo scelto, genera uno dei vertici del ricercato pannello esagonale. E' infatti noto che l'intersezione di tre piani è un punto. E' dunque necessario ripetere l'operazione di intersezione combinando, a gruppi di tre, i sette piani tangenti individuati: si ottengono così 6 punti, i quali rappresentano i vertici dell'esagono. L'applicabilità e la riuscita di tale metodo sono però ostacolate da particolari condizioni geometriche: nelle aree in cui la curvatura gaussiana è nulla, i piani tangenti saranno tra di loro co-planari e sarà pertanto impossibile ricavare i lati dell'esagono.

6.59 - La curvatura della superficie influisce sulla regolarità del pattern esagonale ottenuto in seguito alla planarizzazione delle celle. La deformazione è proporzionale al grado di planarità del tassello. (La planarizzazione e l'analisi della *planarity* e della *closeness* sono stati realizzati con il plug-in *Evaluate Tools Pro*).

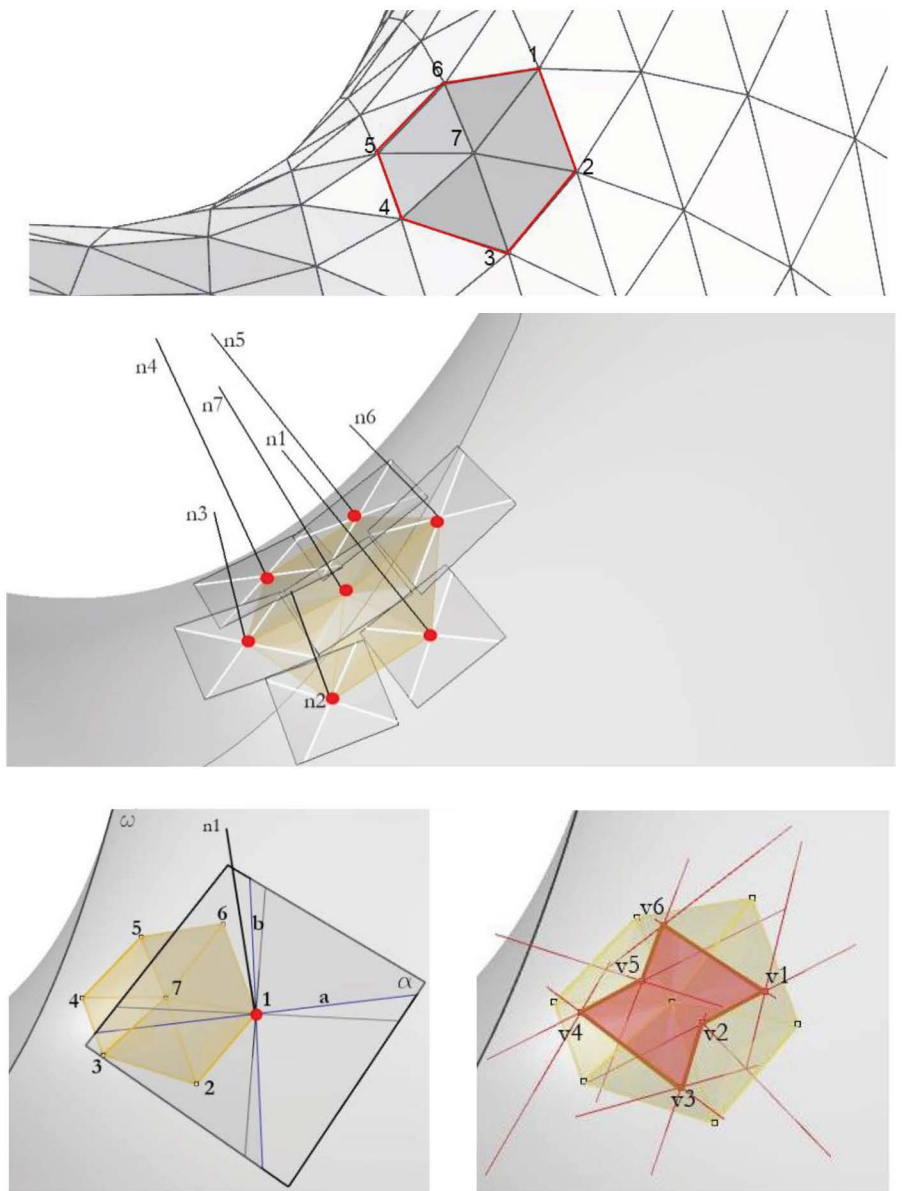


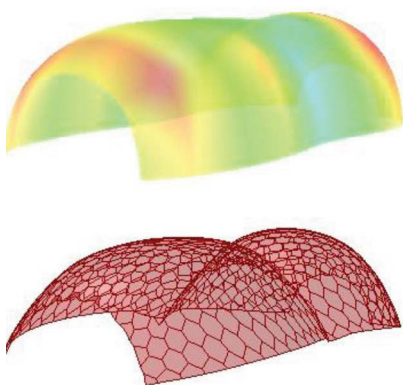


6.63 - TPI su superficie a curvatura gaussiana positiva: l'esagono è convesso.



6.64 - TPI su superficie a curvatura gaussiana negativa: l'esagono assume la forma "a farfalla".





6.65,66,67 - Landesgartenschau Exhibition Hall. A. Menges, ICD/ITKE/IIGS. Le figure mostrano la deformazione dei pannelli esagonali in corrispondenza delle aree della superficie a curvatura gaussiana negativa o nulla.

6.68 - Analisi della curvatura e tassellazione della superficie. La curvatura dell'area centrale della superficie impedisce il completamento della planarizzazione delle celle.

presentano curvatura gaussiana nulla.

A tale proposito, si richiamano per eventuali, maggiori approfondimenti, gli studi di Henrik Joakim Zimmer, che nella sua ricerca *Optimization of 3D Models for Fabrication*, ha presentato un metodo, noto come *VTPI, Variational Tangent Plane Intersection*, in grado di correggere le eventuali anomalie di alcuni tasselli della maglia esagonale ottenuta.⁷⁰

Nel 2009, A.Bagger utilizzava il metodo dei piani tangenti per tassellare le strutture a guscio autoportanti:⁷¹ infatti, poiché la curvatura dei gusci è generalmente positiva, dalla planarizzazione delle celle esagonali distribuite su di essi è possibile ottenere dei tasselli regolari o convessi. Questi studi hanno rappresentato un suggerimento interessante per lo sviluppo delle prove di *digital form finding* i cui risultati sono mostrati all'interno dell'ultimo capitolo (cfr. cap. IX)

Alcuni esempi di strutture esistenti e discretizzate in esagoni mostrano una tassellazione irregolare (fig.6.65,66,67). Pertanto, la sfida è quella di ricercare le condizioni formali ottimali per le quali il pattern esagonale sia più regolare, quindi composto da elementi preferibilmente convessi. Una sperimentazione ottimale per il raggiungimento di questo risultato è rappresentata dai *Cocoon Pavilions*, i casi studio trattati all'interno dell'ottavo capitolo.

6.2.3 Pattern quadrilatero

Il terzo metodo di discretizzazione indagato è quello della pannelizzazione delle superfici mediante elementi quadrilateri piani, definiti *PQ Mesh*, o *Planar Quad Mesh*.

Come per i pattern precedentemente analizzati, la regolarità di tali mesh sarà direttamente dipendente dalla curvatura della superficie su cui la mesh deve essere computata.

E' importante precisare che una quad mesh non coincide con una *Planar Quad Mesh*. Esistono differenti metodi per estrarre una quad mesh da una superficie complessa.⁷² Tra le possibili reti di curve utili per il raggiungimento dello scopo ricordiamo le curve iso-parametriche, le curve geodetiche e le reti di curve coniugate (cfr. cap. V), tra le quali assumono particolare importanza le reti composte dalle linee di curvatura principale, divise tra linee di massima e di minima

curvatura.⁷³

Data una superficie complessa, si costruisce, indipendentemente dalla sua forma, una "mesh grezza", o *coarse mesh* ad essa corrispondente. E' necessario che tale *mesh*, dopo essere stata ulteriormente suddivisa, aderisca alla superficie di riferimento.

E' stato dimostrato (cfr. cap. V) che in presenza di superfici analitiche a singola o a doppia curvatura, è possibile ottenere una mesh quadrilatera composta da elementi piani attraverso la diretta razionalizzazione delle reti di curve coniugate, cioè semplicemente congiungendo i punti di intersezione tra le curve generatrici e direttrici che compongono tali reti.

Di contro, data una superficie complessa, per procedere alla planarizzazione delle celle quadrilatere individuate dalle reti di curve sopra indicate, è necessario, come per il pattern esagonale, applicare degli opportuni algoritmi di planarizzazione delle celle mediante la perturbazione dei vertici rappresentati dai punti di intersezione tra le curve stesse. (fig. 6.69)

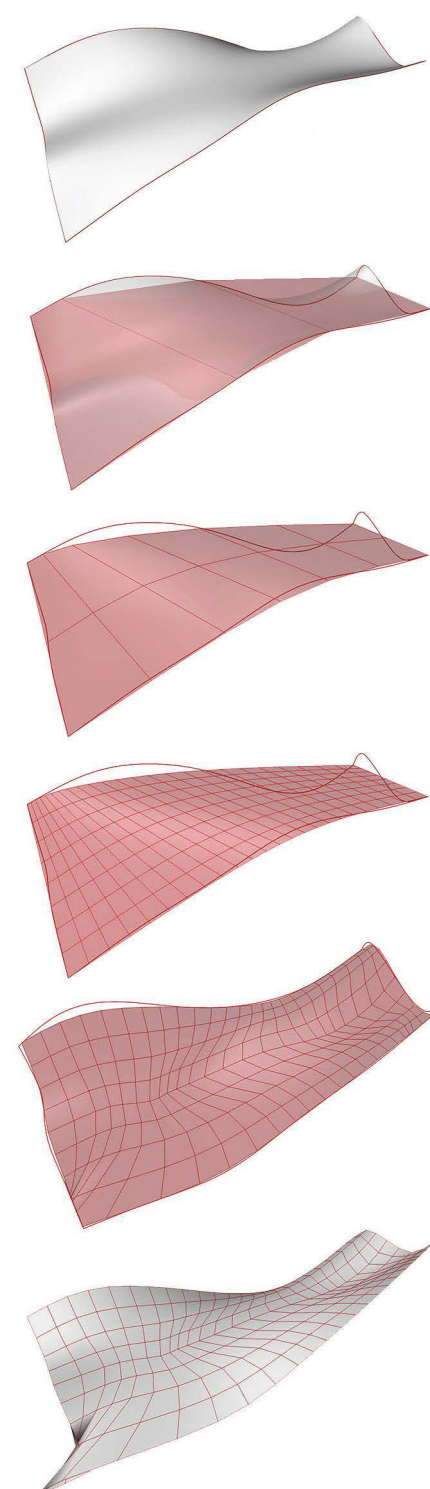
Pertanto, per gestire i vantaggi e le proprietà delle *Planar Quad mesh* in maniera consapevole e finalizzata alla definizione di una nuova forma ottimale per la realizzazione fisica di un'architettura, è importante indagarne i principi geometrici di base.

Tra i più significativi contributi allo studio delle *PQ mesh*, in continua evoluzione, le ricerche del prof. Helmut Pottmann, rappresentano un riferimento imprescindibile. Le *PQ Mesh*, furono introdotte e definite nel 1970 da Roman Sauer⁷⁴ e vennero successivamente analizzate e approfondite da altri studiosi.⁷⁵

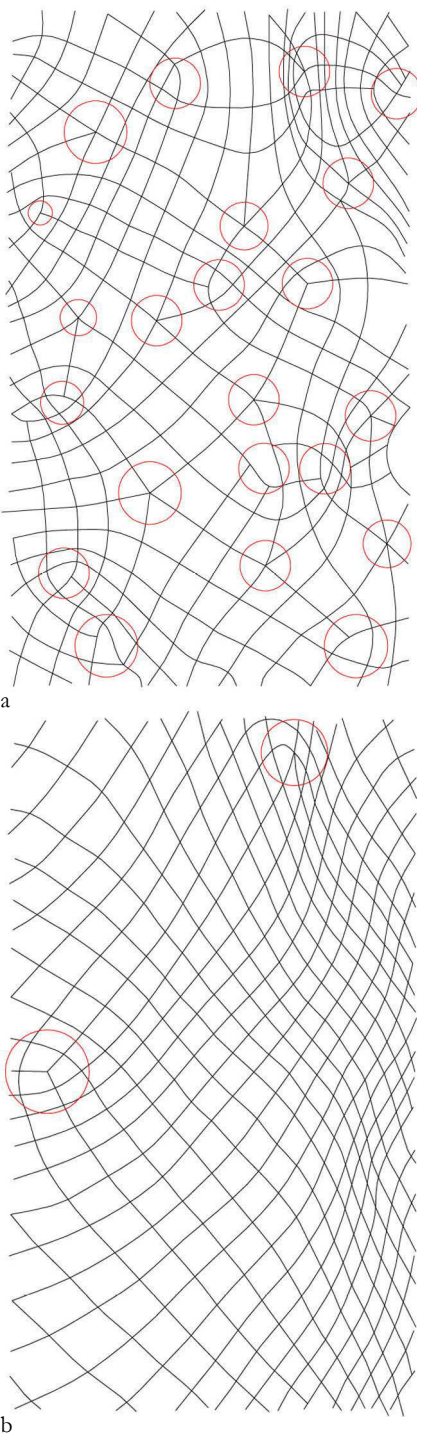
In *Discrete Differential Geometry*,⁷⁶ Aleksandr Ivanovic Bobenko, tratta di specifiche maglie composte da elementi quadrilateri piani che presentano particolari proprietà, note come *Circular mesh*, *Conical mesh* e *Offset mesh*. Esistono, inoltre, particolari casi di porzioni di superfici sviluppabili, denominate *DStrip*, cioè *Developable Strip*, ricavate da successive operazioni di "raffinamento" delle righe o delle colonne che compongono una planar quad mesh, e pertanto definite modelli semi-discreti.

Le righe e le colonne di una planar quad mesh possono essere denominate *Quad Strip* (fig.6.69), da cui deriva, in quanto consequenziali di quest'ultime, il termine *Developable Strip*⁷⁷ (Cfr. par. 6.4).

Si procede, quindi, all'esplicitazione delle regole poste alla base degli



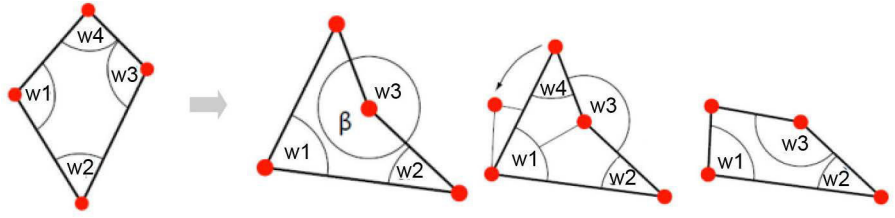
6.69



6.70a - Esempio di rete di linee di curvatura irregolare - b, Esempio di rete di linee di curvatura regolare.
6.71 - La somma interna degli angoli di un quadrilatero piano è pari a 360°.

algoritmi di planarizzazione di celle quadrilatere sghembe distribuite su superfici complesse.
E' possibile ottenere delle *quad mesh* di buona qualità a partire da una rete di curve coniugate: è noto che a ciascuno dei punti di tali reti è associata una coppia di vettori tangenti coniugati.
Le due famiglie di tangenti coniugate generano un campo sulla superficie, definito *Conjugate Direction Field (CDF)*, o Campo delle direzioni coniugate. La regolarità del layout di una *Quad mesh*, e della PQ Mesh corrispondente, può quindi essere controllata“ progettando” il *CDF*.⁷⁸
Come anticipato (cfr. cap. V), grazie ai software in commercio è possibile indicare preventivamente una direzione arbitraria rispetto alla quale calcolare la direzione coniugata, quindi utilizzando una rete di curve che non sia quella delle linee di curvatura principale, ma che sia derivante da scelte di natura puramente progettuale. E' noto che il più importante tipo di rete di curve coniugate è rappresentato dalla rete delle linee di curvatura principale: sappiamo, infatti, che l'angolo di intersezione che si forma tra le tangenti di queste curve, che ricordiamo essere delle tangenti coniugate, è pari a 90 gradi.⁷⁹
Ciò è importante poiché la somma interna W degli angoli di un quadrilatero piano e convesso è pari a 360 gradi, o 2π .

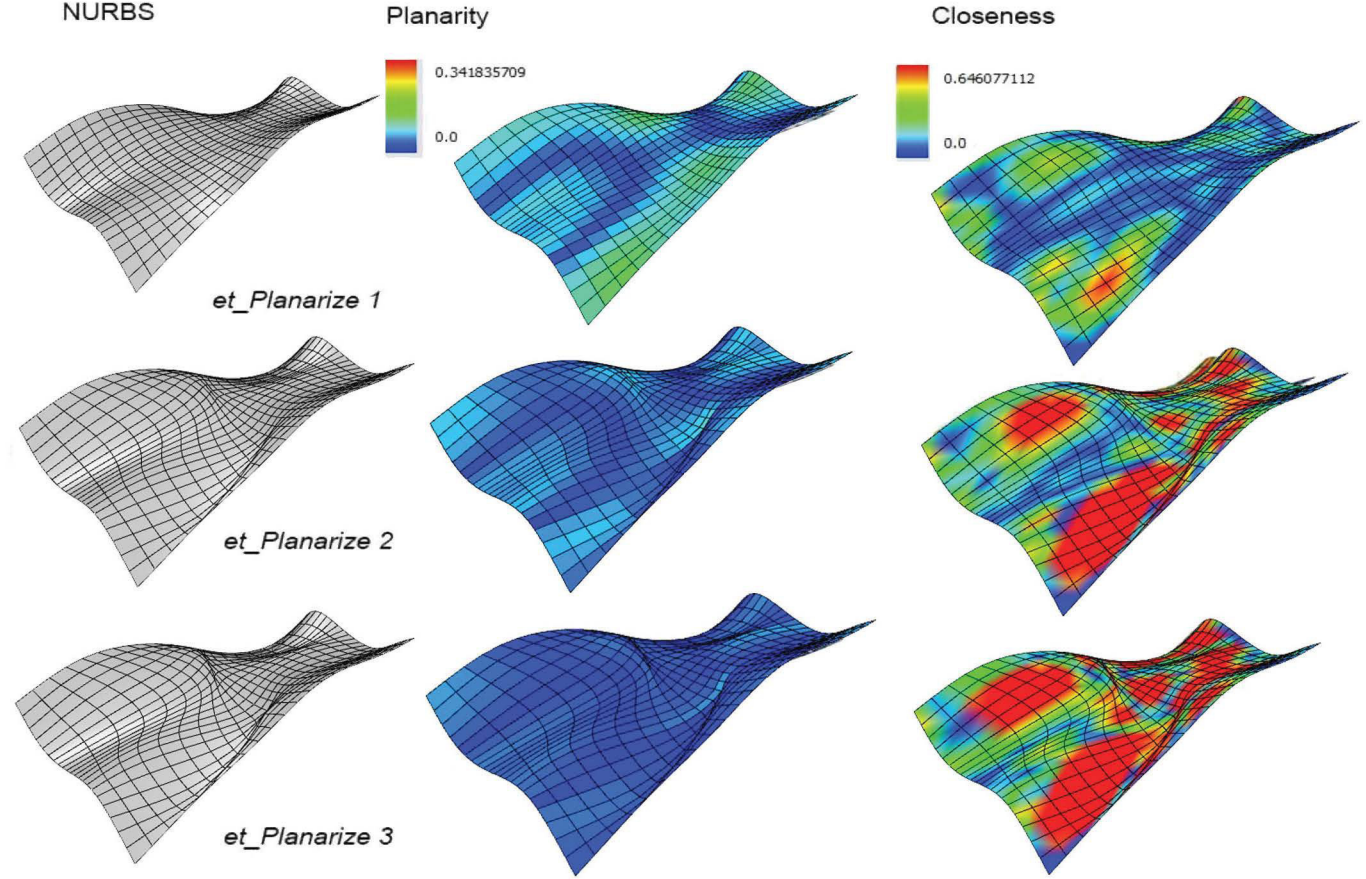
$$W = w1 + w2 + w3 + w4 = 2\pi$$



Al contrario, si dimostra che la faccia f non è piana o convessa, se $W < 2\pi$.

In tal caso, l'algoritmo di planarizzazione effettuerà una rotazione di alcuni vertici tale che la somma degli angoli interni W sia pari a 2π e il quadrilatero risulti convesso, quindi geometricamente riconoscibile, e planare.⁸⁰
In un algoritmo di planarizzazione il primo passaggio consiste nell'effettuare una principal component analysis (PCA), necessaria per determinare, per un intorno di un punto P appartenente alla superficie, le direzioni delle curvature principali, che poi vengono proiettate sul piano tangente la superficie proprio in P . Il passaggio successivo è quello di ricercare la condizione di equilibrio capace di garantire la planarità delle facce quadrilatere.⁸¹
Un algoritmo creato per risolvere questo problema è il *Sequential Quadratic Programming Method (SQP)*, capace di ridurre al minimo la

6.72 - Planarizzazione di una *Quadrilateral mesh* e analisi del grado di planarity e di closeness delle mesh risultanti dai vari step di planarizzazione.



distanza esistente tra i punti distribuiti su un elemento sghembo, riduzione necessaria affinché tali punti diventino complanari.⁸²

Tuttavia, se la rete di curve coniugate presenta dei punti di singolarità, è impossibile, data l'irregolarità delle celle, individuare un bordo quadrilatero. (fig.6.70b)

Pertanto, è ancora una volta confermato che la qualità della rete di linee di curvatura di una superficie influenza inevitabilmente il raggiungimento del risultato desiderato.⁸³

Per ottimizzare l'intero processo, un possibile approccio è quello di manipolare manualmente la maglia di origine prima della planarizzazione. Ad esempio, un buon metodo potrebbe essere quello di agire in maniera consapevole sulla scatola di punti di controllo della NURBS di partenza.

Sfortunatamente, a causa dell'irregolarità che le modifiche di tipo manuale, e quindi locale, determinano, si possono verificare dei significativi cambiamenti della forma di partenza, rendendo così difficile la conservazione della forma desiderata.⁸⁴

Pertanto, alcuni gruppi di ricerca stanno elaborando nuovi metodi per ottimizzare le reti di curve coniugate.

M. Zadavec, A. Shiftner e J. Wallner affrontano la questione strutturando un algoritmo capace di generare una rete di curve coniugate che sia idonea al raggiungimento dello scopo.⁸⁵

Questi matematici hanno tentato di gestire automaticamente le coppie di direzioni coniugate, individuate per i punti di una superficie, basandosi sulla definizione di due matrici: una necessaria per memorizzare le informazioni relative alla curvatura della gaussiana e l'altra, ausiliaria, che esprime la scelta delle direzioni considerate ottimali.

Tale algoritmo è noto come *TCD field*, cioè *Fields of transverse conjugate directions*.

Il termine transverse è di fondamentale importanza, in quanto serve ad indicare che le due direzioni non coincidono: il grado di incidenza tra le due direzioni dipende dall'angolo che si forma tra le stesse, la cui esistenza è fondamentale perché si possa individuare un punto di intersezione tra le due e quindi uno dei vertici di una delle maglie. Lo scopo è, dunque, quello di controllare l'angolo definito tra due direzioni coniugate allo scopo di evitare situazioni in cui le curve siano auto-coniugate, siano cioè sovrapposte l'una all'altra, e quindi non incidenti (cfr. cap. V). E' infatti possibile estrarre una faccia

quadrangolare piana anche quando il valore dell'angolo tra le due curve non è pari a 90 gradi, purché esso non sia mai di valore pari a zero, caso in cui le due direzioni coincidono.

Tuttavia, il metodo incontra dei limiti dovuti alle condizioni di singolarità imposte dalla geometria della superficie in esame, le quali non possono essere facilmente rimosse, se non modificando, anche se in minima parte, la forma originaria.⁸⁶ Si pensa che lo sviluppo di un tale strumento possa rappresentare un mezzo intuitivo per il controllo del *CDF*, eventualmente utile ed accessibile anche agli architetti.⁸⁷ Purtroppo, ancora non esiste una soluzione disponibile per la progettazione dei *CDF*, e ciò comporta un certo numero di operazioni di editing del modello in oggetto.⁸⁸ All'interno del settimo capitolo è mostrata una procedura iterativa finalizzata alla ricerca di una forma ottimale per la definizione di una rete regolare di linee di curvatura principale priva di punti di singolarità. (Cfr. cap. V)

Un possibile approccio, di carattere più intuitivo, per la gestione preventiva e consapevole della forma è quello che, data una mesh piana appositamente vincolata, si possano esplorare e manipolare le diverse configurazioni spaziali derivanti dalla deformazione di tali maglie, mantenendo fissi dei vincoli prestabiliti, e limitando la variazione della forma ricercata entro dei margini di tolleranza accettabili.⁸⁹

Procedendo di pari passo con le ricerche effettuate in questo campo, e restando ancorati alla realtà, si osserva che la progettazione di una superficie, di un involucro, piuttosto che di una copertura o di una facciata, è a sua volta chiaramente vincolata alla progettazione di uno spazio, la quale impone formalmente dei vincoli, e quindi da specifiche condizioni al contorno.

Un nuovo edificio, ad esempio, potrebbe dovere rispettare, oltre che i propri vincoli morfologico-progettuali, anche i vincoli spaziali imposti da eventuali strutture pre-esistenti.

Pertanto, a partire da una maglia piana, opportunamente vincolata ai bordi, è possibile estrapolare molteplici forme: uno degli obiettivi è quello di analizzare le reti di curve delle forme ricavate, visualizzando le eventuali singolarità esistenti, per procedere alle operazioni di ottimizzazione della forma stessa.

Questi approcci consentono all'utente di manipolare, iterativamente, la rete delle linee di curvatura principale.⁹⁰

Su questi presupposti, ed accogliendo questi suggerimenti di avanza-

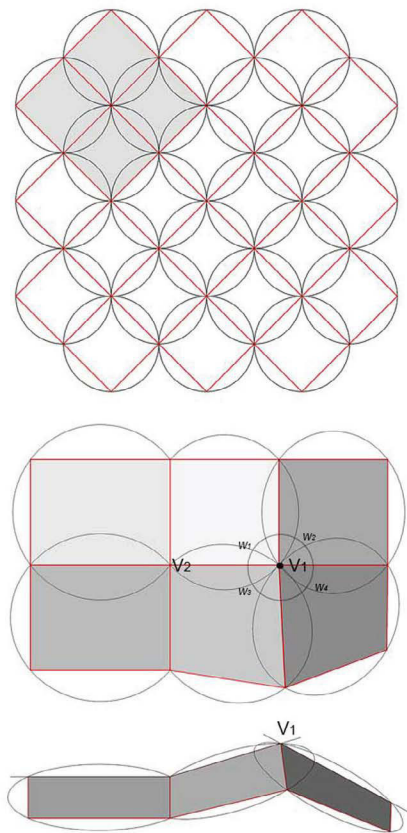
mento, sono state elaborate le prove mostrate all'interno dell'ultimo capitolo (Cfr. IX).

Di seguito, vengono introdotte due particolari tipologie di *PQ Mesh*: le *Circular Mesh* e le *Conical Mesh*. Le *Conical* e le *Circular mesh* derivano, come le *PQ Mesh*, dalla discretizzazione delle reti di linee di curvatura principale di una superficie.⁹¹ Ciò dimostra la convenienza nello scegliere una rete di linee di curvatura principale come maglia di partenza.

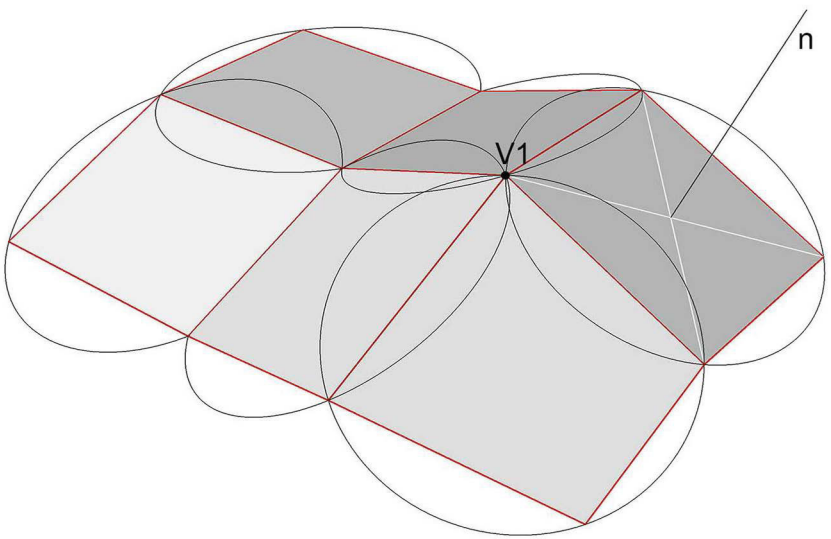
Le *Circular mesh* sono state introdotte da R. R. Martin⁹² e, successivamente, sono state oggetto di studio da parte di Bobenko e di Suris.⁹³

Esse sono composte da elementi quadrilateri che, oltre ad essere piani, sono anche inscritti in una circonferenza.⁹⁴ (fig.6.73)

La condizione geometrica che è necessario ottenere o verificare nel caso in cui l'obiettivo sia quello di ottenere una *Circular mesh* è che in

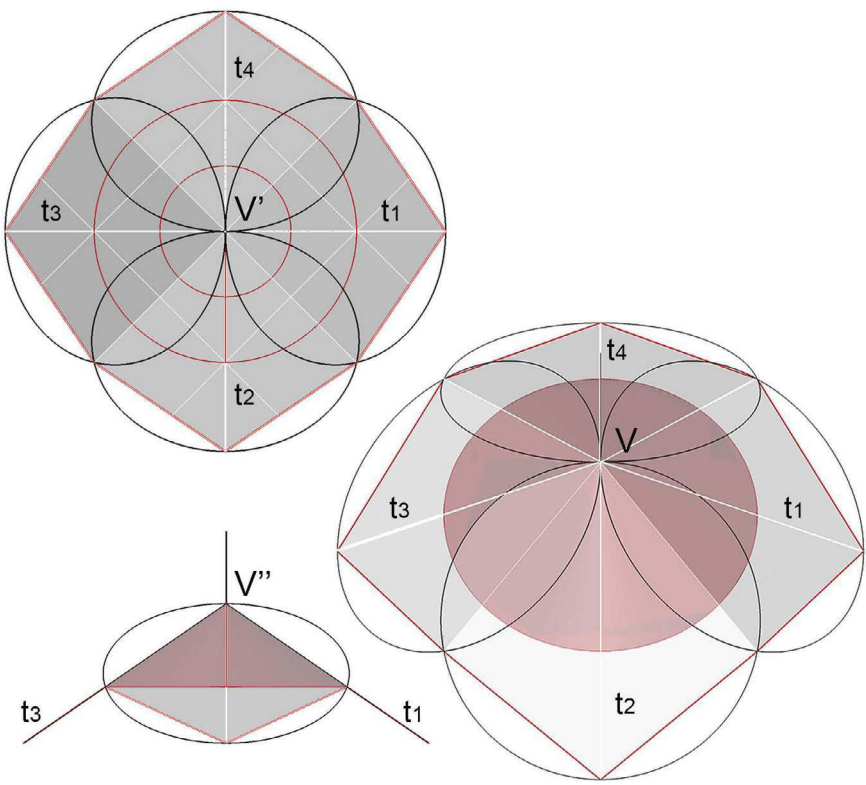


6.73,74 - Le *Circular mesh* sono composte da facce quadrilatere piane iscritte in una circonferenza.



ogni quadrilatero convesso e piano il valore espresso dalla somma degli angoli interni sia pari a 2π , a cui va aggiunto il vincolo che per ogni vertice deve valere:⁹⁵

$$\omega_1 + \omega_3 - \omega_2 - \omega_4 = 0$$

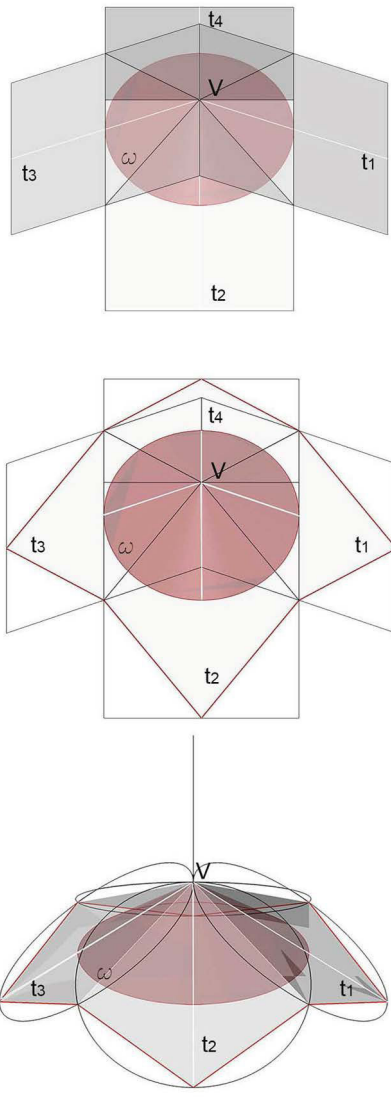


Nelle *Conical mesh*, la proprietà geometrica più importante, caratteristica che ne definisce anche il nome, è rappresentata dal fatto che, prese quattro facce adiacenti appartenenti alla mesh, esse saranno tangenti ad un cono di rivoluzione avente centro nel vertice comune alle quattro facce considerate e il cui asse è rappresentato dalla normale uscente dal vertice stesso. (fig. 6.74,75)

Una *Conical mesh* può, inoltre, essere considerata il corrispondente spaziale di una *Circular mesh*: come, infatti, i quattro vertici di un elemento appartenente ad una *Circular mesh*, sono inscritti in un cerchio, così le quattro facce orientate di una porzione di *Conical mesh* sono tangenti ad un cono di rivoluzione ω . Il vertice V, comune a quattro facce, è definito *Conical vertex* se, e solo se, l'equivalenza di sopra è soddisfatta.

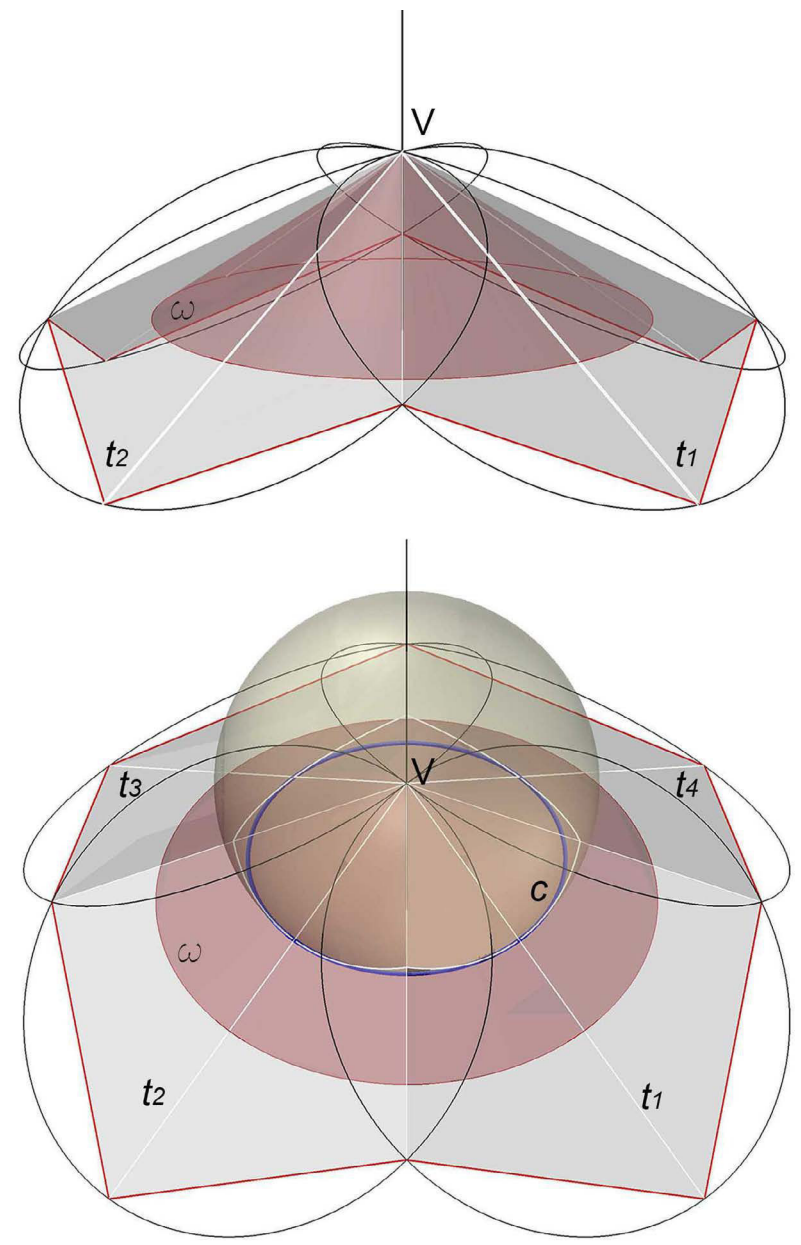
Tale condizione rappresenta un vincolo fondamentale per la computazione algoritmica di una *Conical Mesh*.⁹⁶

Date quattro facce quadrilateri incidenti in un vertice V, si generi



6.74,75 - *Conical mesh*

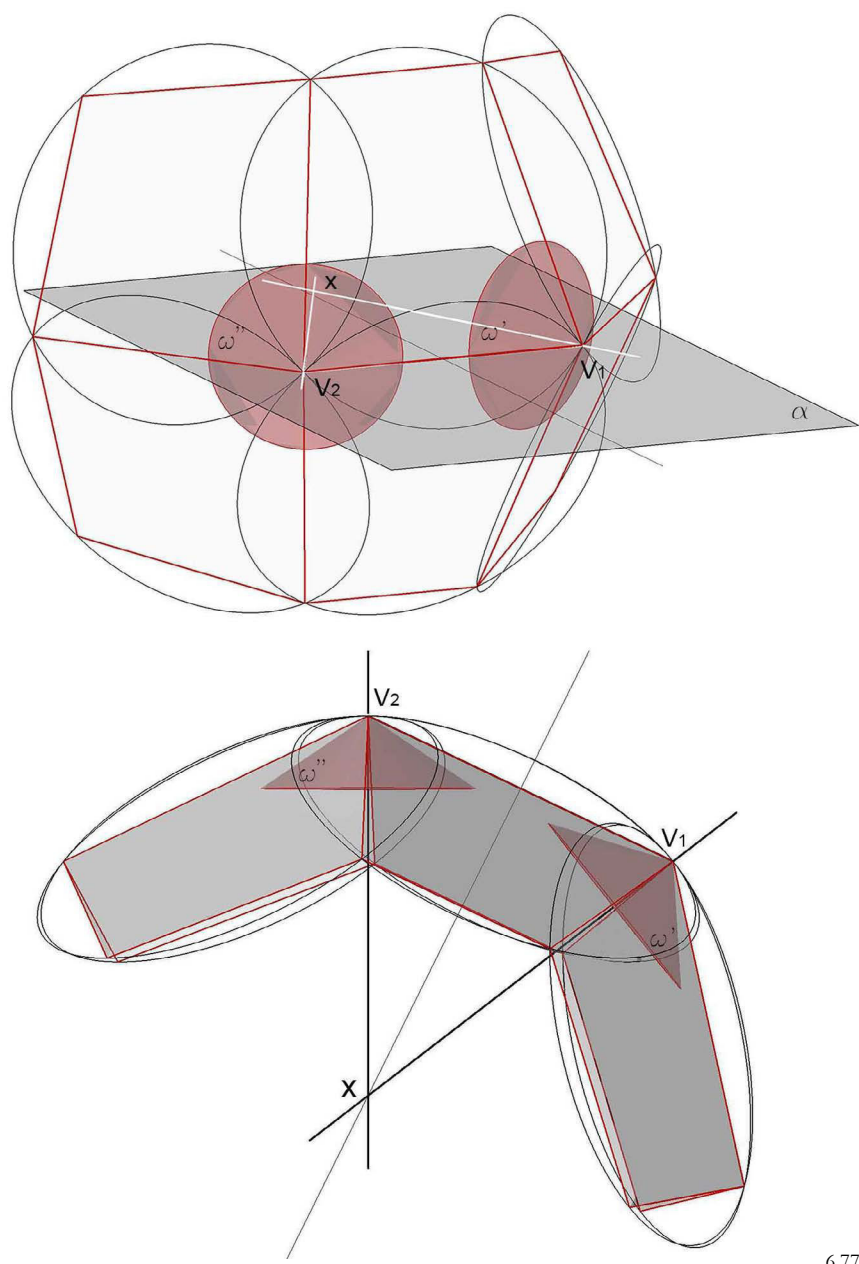
una sfera avente centro in V. La sfera intersecherà le quattro facce, e le curve ricavate da tale intersezione comporranno un poligono sferico di quattro lati. (fig.6.76)



6.76

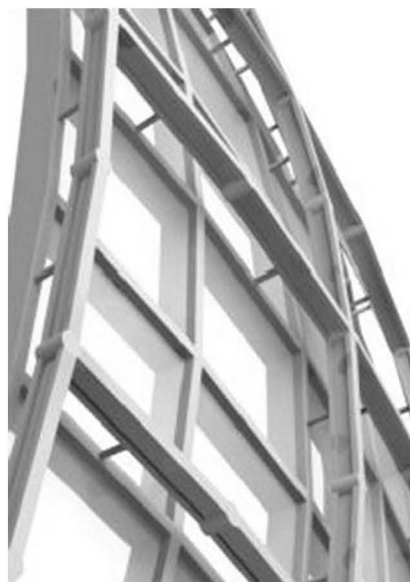
Se i quattro lati del poligono sferico sono contenuti nello stesso semispazio, ci troviamo in presenza di un punto iperbolico, altrimenti si parla o di punto ellittico, o di punto parabolico.⁹⁷
Se le quattro facce di partenza compongono una *Conical mesh*,

i quattro lati circolari del poligono sferico saranno tangenti ad un cerchio c i cui centri sono allineati con il vertice V, il quale ha valenza 4.⁹⁸

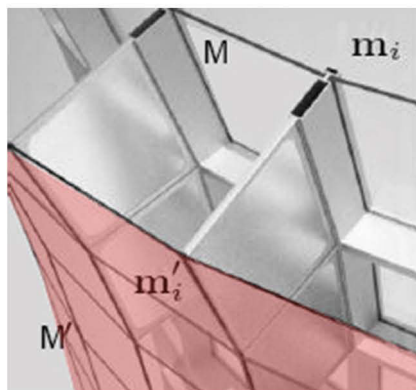


6.77

In una *Conical mesh*, gli assi dei coni di vertici V1 e V2 di due gruppi composti ciascuno da quattro facce tangenti ai rispettivi coni ω_1 e ω_2 , di cui una in comune, sono complanari e incidenti in x (fig.6.77). L'involuppo di tali piani genera una superficie sviluppabile ortogona-



a



b



c

6.78a,b,c - Esempi di strutture multistrato e di strutture composte da travi ad altezza costante ricavate mediante l'offset di una mesh di partenza.

le alla maglia: il bordo di tale striscia rappresenta, a sua volta, la linea di curvatura di base di cui i bordi delle facce della *Conical mesh*, a loro volta, rappresentano il corrispondente discreto.

Quindi, è importante richiamare la proprietà⁹⁹ per la quale è noto che le normali ad una curva rappresentano le generatrici di una superficie sviluppabile se, e solo se, tale curva è una linea di curvatura principale.

Pertanto, da questi due presupposti segue la relazione che definisce i bordi poligonali delle *Conical mesh* quali il corrispondente discreto delle linee di curvatura principale.

Speculando sul tema, gli studiosi e i matematici impegnati in questo campo di ricerca, si sono interrogati se esitano maglie che siano contemporaneamente sia circolari, che coniche.

La risposta è, come dimostrato dalle precedenti figure, affermativa: esistono interessanti esempi di maglie coniche che presentano un costante angolo di apertura dei coni tangenti ai gruppi di quattro facce, le quali sono allo stesso tempo inscritte in dei cerchi di raggio costante.¹⁰⁰

Queste particolari tipologie di *mesh* derivano dalla razionalizzazione di superfici che presentano una distribuzione costante di punti in cui la curvatura Gaussiana è negativa.¹⁰¹

Il caso studio indagato all'interno del settimo capitolo ne rappresenta un esempio concreto (Cfr. cap. VII).

Tuttavia, maglie con entrambe le proprietà presentano una struttura geometrica troppo rigida e quindi una scarsa duttilità per discretizzare, in qualsiasi caso, una superficie complessa.¹⁰²

Grazie agli specifici software esistenti in commercio è disponibile un algoritmo che consente la creazione di una *Circular* o di una *Conical mesh*. L'algoritmo *Conical/Circular perturbation* del *plug-in Evolute Tools Pro* produce risultati di grande interesse anche dal punto di vista estetico, generando mesh isotrope che presentano variazioni limitate e gradualmente in termini di lunghezza e di direzione degli spigoli se rapportate alle misure originarie.¹⁰³

Ulteriori studi, sempre rivolti alla ricerca di soluzioni per la costruzione di architetture di forma complessa, sono attualmente rivolti all'analisi del comportamento statico delle PQ mesh e all'utilizzo delle maglie coniche e delle loro proprietà di offset per lo studio e la discretizzazione di particolari tipologie di strutture a guscio.¹⁰⁴

Le *Circular* e le *Conical mesh* hanno la caratteristica fondamentale di possedere una struttura geometrica tale da consentire l'offset della mesh di partenza: ciò rende possibile la realizzazione di involucri costituiti da pacchetti multistrato e di strutture portanti in grado di seguire fedelmente la forma di origine. (fig.6.81)

La *mesh* che si ottiene dall'offset di una *Conical* o di una *Circular mesh*, ne conserverà le stesse proprietà.¹⁰⁵

6.3 Le Offset mesh

Abbiamo già anticipato che le mesh che consentono la possibilità di effettuare l'offset della maglia di partenza sono le più interessanti dal punto di vista tecnologico.

Due mesh sono l'una l'offset dell'altra se sono parallele e se la loro distanza reciproca è costante.¹⁰⁶

Si consideri una *mesh* M, la sua *offset mesh* M' a una distanza d e se ne definisca l'immagine gaussiana (poliedro di Koebe).

In un poliedro di Koebe tutti gli spigoli sono tangenti ad un'unica sfera che interseca le facce secondo cerchi inscritti (in rosso); per ogni vertice passa un cono che è tangente alla sfera generando cerchi (in blu) ortogonali ai precedenti (fig.6,80).¹⁰⁷ Si ha che:

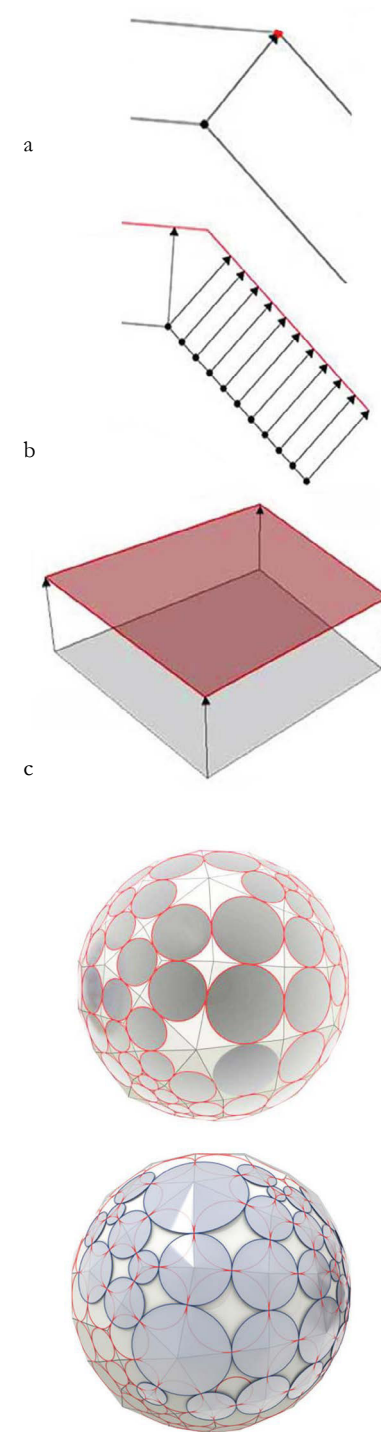
una *mesh* è una *vertex offset mesh* se e solo se la *Quad mesh* di partenza è una *Circular mesh*;

una *mesh* è una *edge offset mesh* se i lati dell'immagine gaussiana corrispondente alla mesh di partenza sono tangenti ad una sfera;

una *mesh* è una *face offset mesh* se le facce dell'immagine gaussiana corrispondente alla mesh di partenza sono tangenti ad una sfera.

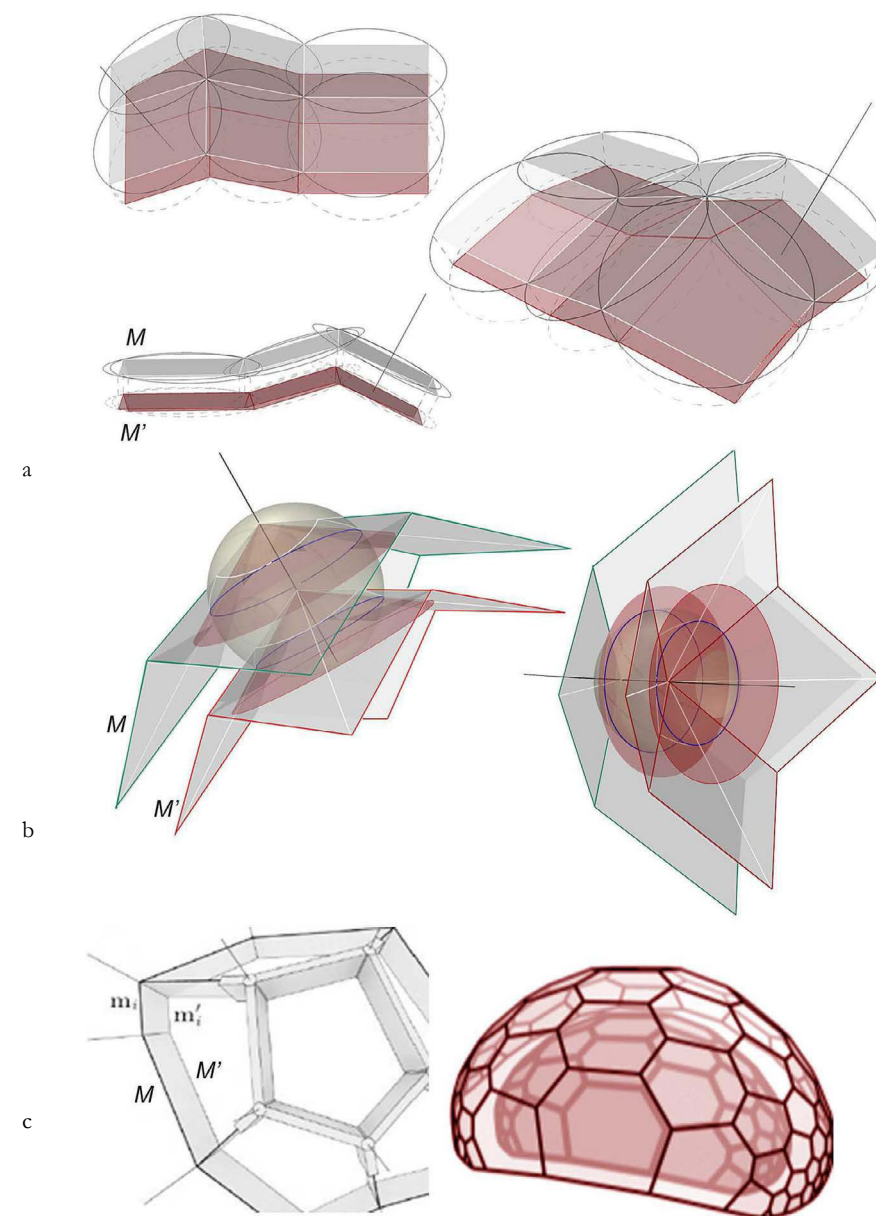
Inoltre, una *mesh* possiede una *face offset mesh* se e solo se le facce della mesh di partenza sono tangenti ad un cono di rivoluzione (*Conical mesh*).¹⁰⁸

Attualmente, gli studiosi impegnati nel problema dell'*architectural surfaces paneling* sono particolarmente interessati a sviluppare delle ricerche mirate alla realizzazione di strutture di forma libera di tipo mono e multistrato.¹⁰⁹ A differenza dalle *mesh* esagonali e quadrilateri, le mesh triangolari non possiedono proprietà di offset costante applicabile alle facce o ai bordi delle reti di partenza:¹¹⁰ escludendo i poliedri regolari, semi-regolari (o archimedei) e catalani (duali di quest'ultimi), per le *mesh* triangolari non è infatti possibile ottene-



6.79a,b,c - Offset vertex, Offset edges e Offset face.
6.80 - Esempio di poliedro di Koebe.

re vertici senza torsione.¹¹¹ Nelle *offset mesh* è necessario che venga mantenuta una corrispondenza biunivoca tra vertici, spigoli e facce appartenenti alle mesh in gioco. Ciò assicura che per ogni vertice della *mesh* i piani assiali delle travi costruite lungo i bordi dei tasselli hanno la stessa giacitura, sono cioè complanari. Nelle superfici discrete è dunque possibile individuare tre tipi di *offset* (fig.6.79a,b,c) ottenuti mantenendo una distanza fissa: *offset* tra gli spigoli (*edges offset mesh*), tra i vertici (*vertex offset mesh*) e tra le facce (*face offset mesh*).¹¹²



6.81 - Circular Offset mesh, Conical Offset mesh e Offset mesh di una mesh esagonale.

In particolare, le *edges offset mesh* e le *face offset mesh* consentono, rispettivamente, di realizzare strutture composte da travi ad altezza costante e strutture multistrato. Come dimostrato in figura 6.81b, data una *Conical mesh*, se si considerino due vertici consecutivi V1 e V2, esisteranno due facce che saranno tangenti ad una stessa coppia di coni con assi complanari ed incidenti in un punto x e appartenenti al piano bisettore α . Questa proprietà dimostra la possibilità di costruire un sistema di piani ortogonali alla *mesh* iniziale per consentire la realizzazione di una struttura multistrato.¹¹³

La possibilità di lavorare sullo spessore che ciascuno dei tasselli raggiunge in seguito all'*offset* dell'intero sistema discreto, apre delle interessanti ricadute nel campo della stereotomia di forme complesse (Cfr. IX).

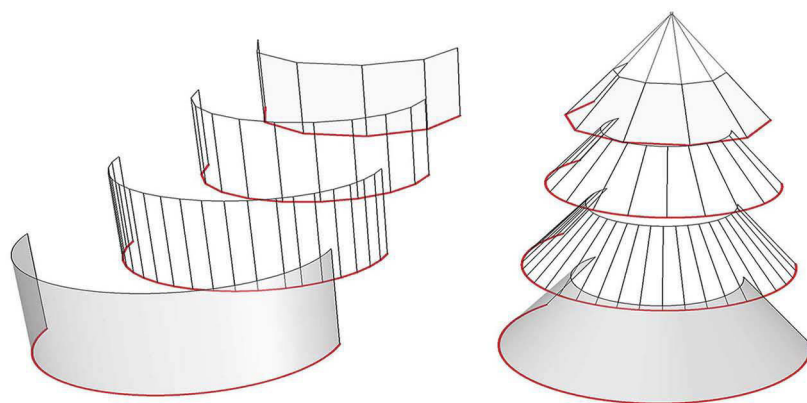
6.4 Dai modelli semi-discreti ai sistemi misti: i pannelli curvi

Se un sistema, in quanto tale, deriva dalla composizione di più elementi, un modello è un prodotto unico e finito, capace di descrivere uno o più fenomeni e leggi definite sulla base di una serie di relazioni.¹¹⁴

Pertanto, nelle definizioni stesse dei termini utilizzati, modelli semi-discreti e sistemi misti, è chiaramente visibile la differente natura geometrica che li contraddistingue: un modello semi-discreto è un prodotto unico, risultante dall'applicazione di specifiche regole a partire da un sistema iniziale di tipo discreto e successivamente ulteriormente raffinato, mentre un sistema misto si compone di un certo numero di elementi, uguali o diversi tra loro, mutuamente assemblati.

Da un semplice pezzo di carta, ad esempio, è possibile generare numerosi modelli: dalla piegatura, flessione e torsione di un unico pezzo piano è possibile creare, senza strappi, differenti forme sviluppabili. Tale approccio rappresenta un valido processo progettuale: come mostrato nei capitoli precedenti, questa metodologia è attualmente utilizzata da diversi architetti contemporanei. Il principio di questi modelli potrebbe essere paragonato ad una serie di strisce di carta adiacenti ed aderenti l'una all'altra.¹¹⁵

Maggiori approfondimenti sulle *PQ Mesh* forniscono un approccio geometrico – matematico utile per ottimizzare ulteriormente il processo di discretizzazione e di fabbricazione di forme complesse. Note le proprietà geometriche alla base delle *PQ Mesh*, è infatti possibile trasformare porzioni di superfici a doppia curvatura in modelli semi-discreti, anche definiti con il termine *DStrip*, o *Developable Strip*, cioè strisce di superfici a singola curvatura, e quindi sviluppabili.¹¹⁶ Richiamando i principi dimostrati nel capitolo precedente, si dimostra che l'ulteriore suddivisione delle facce che compongono le righe o le colonne di una *Planar Quad Mesh*, genera una superficie sviluppabile. A partire da una *PQ Mesh*, si consideri una *PQ Strip*, cioè una



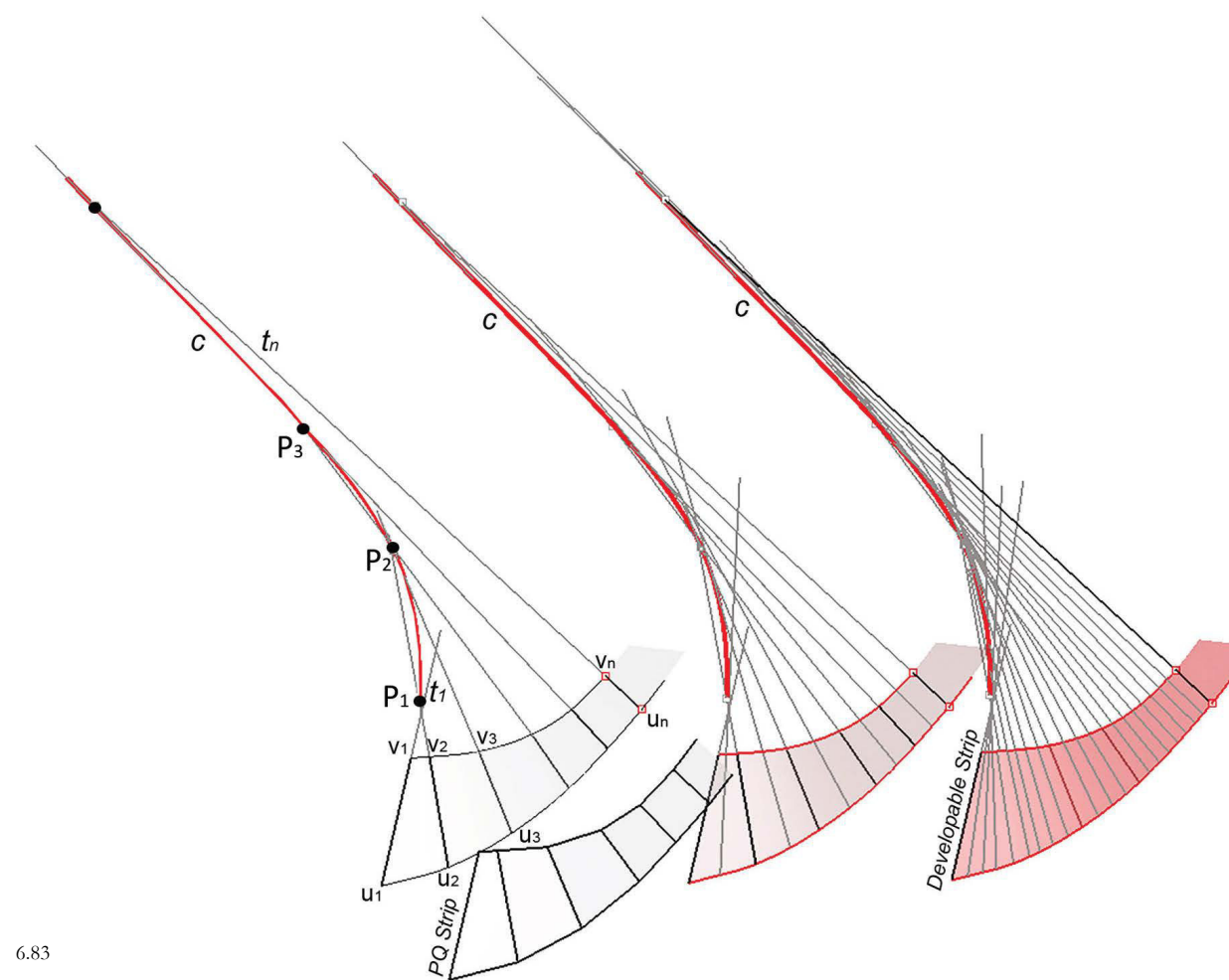
6.82

riga o una colonna di tasselli quadrilateri piani e consecutivi. I vertici dei quadrilateri adiacenti che compongono tale *PQ Strip*, congiunti da segmenti rettilinei, sono indicati con le lettere v_1, v_2, \dots, v_n e u_1, u_2, \dots, u_n .

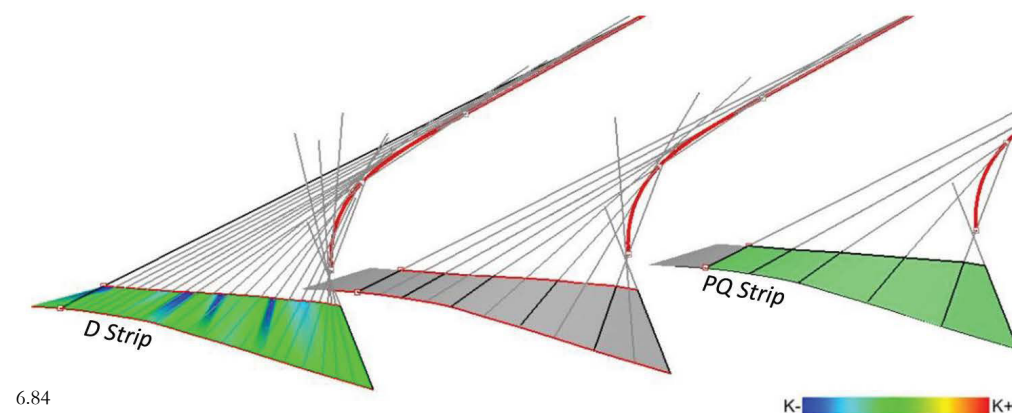
Data la planarità di ogni singola faccia, prolungando i segmenti che congiungono tali vertici è possibile individuare un punto di incidenza, il quale può essere proprio o improprio.

Se i bordi di tali tasselli sono mutuamente paralleli, la loro unione genera una superficie cilindrica e la *PQ Strip* sarà di tipo cilindrico; se il prolungamento dei bordi dei tasselli converge in un punto, la loro unione genera un cono e la *PQ Strip* sarà conica;

se il prolungamento dei bordi individua, per ciascuna coppia di segmenti, un punto nello spazio, il congiungimento di tutti i punti così individuati genera una polilinea sghemba, definita poligono di regresso, e dall'interpolazione di tali punti sarà possibile generare la



6.83



6.84

curva di regressione c , o spigolo di regresso.¹¹⁷ (fig.6.83)

I bordi consecutivi e a coppie incidenti rappresentano parte delle infinite tangenti t_n di tale curva di regressione: aumentando la quantità

del numero di tangenti, aumenta anche il numero di bordi di tasselli piani consecutivi i quali coincidono con le generatrici della striscia sviluppabile. La sviluppabilità della striscia è dimostrata dal fatto che la sua curvatura gaussiana è nulla in ogni punto (fig.6.84): essa sarà data dal prodotto tra i cerchi osculatori individuati sui punti appartenenti al bordo perimetrale curvo della striscia e le rette generatrici passante per quei punti.

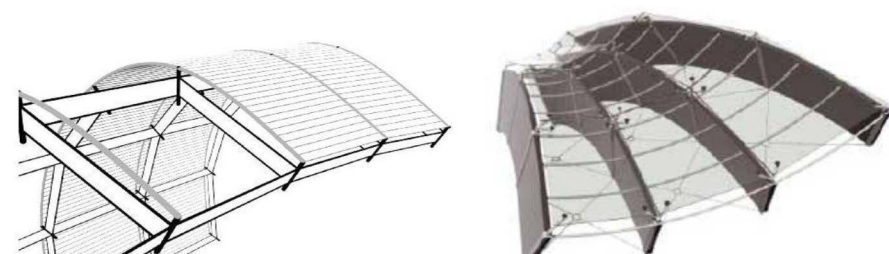
Inoltre, la condizione necessaria affinché la superficie sia sviluppabile è rappresentata proprio dall'incidenza e dalla complanarità di due generatrici consecutive.¹¹⁸

Una rigata che sia anche sviluppabile ammette un piano tangente in ogni punto di una sua generatrice: tale piano è individuato proprio dalla faccia piana quadrilatera di cui le due generatrici sono i bordi. Infatti, essendo due bordi consecutivi necessariamente complanari, essi rappresentano due generatrici appartenenti allo stesso piano tangente: queste generatrici si dicono singolari. Quindi, condizione necessaria e sufficiente affinché una striscia sia sviluppabile è che tutte le generatrici siano singolari.¹¹⁹ Dunque, generalizzando il principio, le rette tangenti di una curva sghemba rappresentano le generatrici di una superficie sviluppabile, come dimostrato (Cfr. V). E' preferibile che la maglia dalla quale è stata estratta la *PQ Mesh* di partenza sia una rete di curve coniugate, meglio ancora se tali curve sono linee di curvatura principale. Al contrario, potrebbero verificarsi delle auto-intersezioni, delle pieghe e altre deformazioni indesiderate che comprometterebbero la regolarità e la sviluppabilità delle strisce.¹²⁰ Analogamente, è dimostrato che una *PQ Strip* rappresenta la versione discreta di una *DStrip*: diminuendo, infatti il numero di tali generatrici, si regredisce nuovamente verso l'iniziale numero di bordi delle facce piane considerate, ottenendo la versione grezza della striscia sviluppabile ricavata. Inoltre, considerando, al limite, i due cerchi osculatori dei due bordi perimetrali curvi di una striscia sviluppabile, e congiungendo i due punti rispetto i quali tali cerchi osculatori sono stati individuati, è possibile ricavare, sulla curva di regressione, un punto che rappresenterà il vertice di un cono passante proprio per i due cerchi osculatori considerati. Tale cono viene definito, per queste ragioni, cono osculatore, e presenta una continuità di secondo ordine, quindi in curvatura, con la striscia sviluppabile ottenuta.¹²¹ L'intero processo dimostra come sia possibile passare da

un modello continuo, la NURBS di partenza, al suo corrispondente modello discreto, la *PQ Mesh*, per poi ricavarne un modello di tipo semi-discreto, la *DStrip*, ampliando le possibilità di ottimizzazione di una superficie a doppia curvatura variabile.

Lo sviluppo piano di tali strisce consente di ricavare un profilo piano che verrà utilizzato per ritagliare le porzioni di materiale con il quale si intende realizzare la superficie progettata. Un'applicazione di tale costruzione è stata trattata all'interno del settimo capitolo. Infine, si osserva che le *DStrip* che derivano da *Circular* o *Conical mesh* mantengono le proprietà geometriche delle mesh da cui derivano: come nelle *Circular mesh* ciascuna faccia è inscritta in un cerchio, così nelle *Circular DStrip* ciascuna generatrice sarà iscritta in un cerchio; come quattro facce piane di una *Conical mesh* sono tangenti ad un cono, così nelle *Conical DStrip* ciascuna generatrice sarà tangente ad un cono. Come è possibile osservare nella fig. in una *Conical mesh*, gli assi dei coni formano una superficie sviluppabile continua, in quanto sviluppo di piani bisettori individuati tra le facce.¹²²

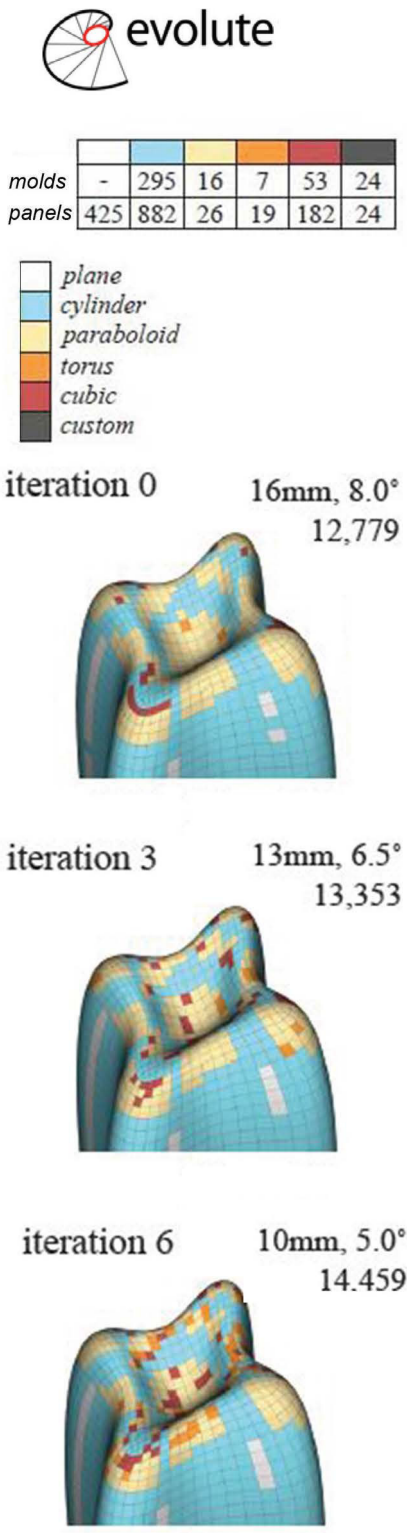
Sfruttare la possibilità di gestire e di utilizzare le strisce sviluppabili per discretizzare una superficie complessa offre innumerevoli vantaggi, nonostante solo recentemente sono stati sviluppati dei *tools* in grado di discretizzare una superficie complessa in strisce sviluppabili. Il comando *et-Subdivide/DStrip* del *plug-in Evolute Tools Pro* permette



6.85

di ricavare una *DStrip* a partire da una *PQ Strip*.

Una singola *PQ strip*, sistema discreto, può essere ulteriormente suddivisa e trasformata in una *DStrip*, modello semi-discreto, applicando l'algoritmo di perturbazione *Lane-Riesenfeld* (1980), messo a punto per il calcolo delle medie e la cui ripetizione genera curve *B-Spline* e superfici *B-spline*.¹²³ Anche in questo caso, come per le *PQ Strip*, è chiaro che una superficie complessa può, e deve, essere suddivisa in



6.86 - Panel Fitting mediante vari tipi di pannelli.

un certo numero di strisce.

Queste procedure sono particolarmente adatte per i materiali flessibili. Si pensi, ad esempio, ai possibili vantaggi che potrebbero derivarne nel caso in cui si voglia interamente rivestire una superficie curva e complessa utilizzando strisce di un determinato materiale flessibile.

Per tutti i vantaggi sottolineati e dimostrati, la ricerca sui modelli semi-discreti e sui sistemi misti per la pannellizzazione di superfici complesse è, attualmente, molto aperta, e comprende anche la sperimentazione di altre tipologie di superfici.¹²⁴

Come anticipato (Cfr. cap. III), recentemente è stato sviluppato, nell'ambito del progetto di ricerca *ARC*, un algoritmo che affronta il problema della discretizzazione di forme complesse, attraverso la distribuzione ottimizzata di pannelli di vario tipo: tale algoritmo è contenuto nel modulo *Panel Fitting* (non *open source*), del *plug-in Evolute Tools Pro*.¹²⁵

Grazie alle ricerche condotte dal gruppo Evolute GmbH, è possibile distribuire su una superficie complessa cinque tipi differenti di pannelli: piani, cilindri, tori, paraboloidi iperbolici, porzioni di superfici sviluppabili generiche e pannelli customizzati, cioè superfici a doppia curvatura non rigate. (fig.6.86)

E' evidente che ben cinque di queste sei tipologie di superfici, sono a curvatura gaussiana negativa o nulla: ciò è dovuto alle note proprietà delle superfici rigate, sviluppabili e non, che com'è noto offrono dei grandi vantaggi da un punto di vista costruttivo. L'algoritmo trasforma la patch a doppia curvatura in una porzione di rigata attraverso l'allineamento delle linee asintotiche delle superfici: si ricorda, pertanto, che i punti iperbolici appartenenti ad una superficie assumono particolare importanza per l'individuazione di tali tangenti, in quanto per tali punti esse saranno reali e distinte.

Si osserva, dunque, che le stesse proprietà geometriche che hanno reso le superfici rigate le tipologie preferibili per la realizzazione di manufatti architettonici alla grande e media scala, sono oggi utilizzate per scomporre le superfici di forma complessa in parti geometricamente più semplici e riconoscibili, mirando ad un approccio economicamente ottimizzato, quindi più sostenibile.

Il loro uso permette di conservare l'andamento curvo della superficie progettata, favorendone la resa espressiva ed estetica.

I pannelli piani rappresentano sicuramente la tipologia più semplice ed economica da produrre, ma spesso non raggiungono risultati elevati dal punto di vista del mantenimento di una coerenza espressivo-morfologica delle forme.

I pannelli cilindrici rappresentano un'ottima alternativa, in quanto appartengono al gruppo delle superfici sviluppabili.

I paraboloidi iperbolici ed i tori presentano, come curve di sezione, parabole e cerchi che ne semplificano la realizzazione fisica.

Come per i pannelli cilindrici, anche per queste tipologie vale la possibilità di potere reimpiegare più volte gli stampi prototipati, estraendo da uno stampo di dimensioni maggiori un elevato numero di pannelli.

I pannelli customizzati, poiché non subiscono nessuna trasformazione o semplificazione in termini di curvatura, rappresentano la tipologia più costosa, perché per realizzare ciascuno di questi pannelli sarà invece necessario prototipare, pannello per pannello, uno stampo differente. La distribuzione di pannelli cilindrici, in quanto a singola curvatura e quindi sviluppabili, rappresenta la versione economicamente più conveniente tra tutte le combinazioni di superfici possibili. (fig.6.87)

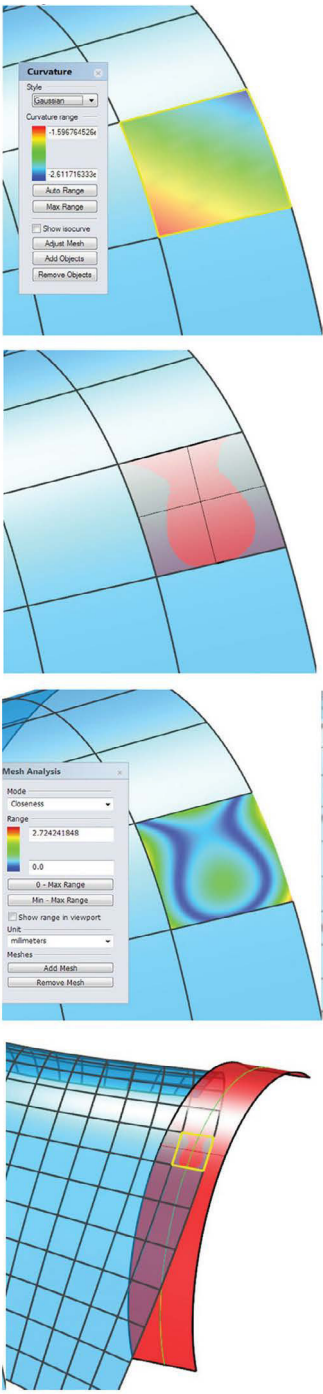
E' intuitivo che le aree che presentano curvatura gaussiana negativa potranno essere più semplicemente approssimate da porzioni di superfici sviluppabili, in quanto ciò permette di seguire più fedelmente la morfologia della superficie stessa.

La chiave per ottimizzare l'intero processo dal punto di vista economico consiste nell'estrapolare il maggiore numero possibile di gruppi di pannelli aventi la stessa curvatura, in maniera tale da limitare il numero di stampi necessari per la loro produzione.

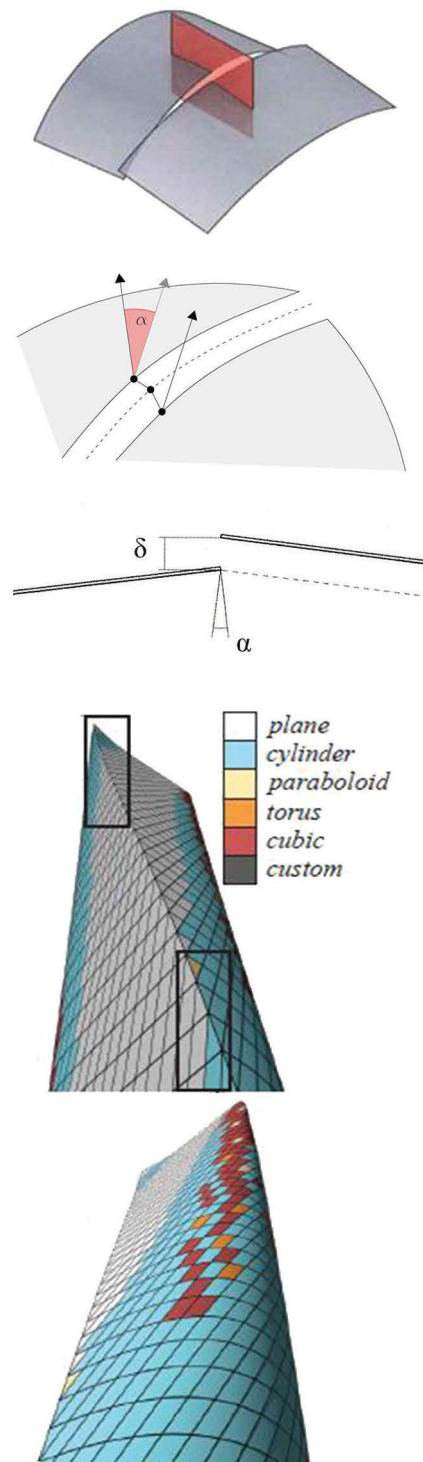
Infatti, la produzione degli stampi risulta, di per sé, più costosa rispetto alla produzione dei singoli pannelli.

Più in generale, l'algoritmo calcola la forma e la distribuzione di una serie di pannelli, misti tra piani e curvi, sulla superficie da discretizzare. Inoltre, esso è in grado di controllare la sostenibilità e la qualità delle approssimazioni locali della superficie, computando una soluzione di pannellizzazione ottimizzata per un intero edificio.

E' stato ideato e testato principalmente per i cantieri di grandi dimensioni, i quali, dati i costi elevati che ne derivano, non consentono un'ottimizzazione di tipo manuale che sia attendibile e, allo stesso



6.87 - Trasformazione di una porzione di superficie a doppia curvatura in superficie cilindrica.



6.88 - Rappresentazione del *kink angle* e della *divergence* tra pannelli curvi.

6.89 - Impossibilità di computare il *Panel Fitting* in corrispondenza di spigoli.

tempo, agevole dal punto di vista della sua esecuzione. Ottimizzare un'area di una superficie *free form*, significa cercare il tipo di pannello in grado di assecondare il più possibile la curvatura di quel tratto, ma al minimo costo di produzione. Sarà quindi necessario determinare il numero e il tipo di pannelli, calcolare le forme di pannelli più idonee e calcolarne la distribuzione ottimale nel rispetto dei requisiti progettuali, funzionali ed estetici. Il grado di tolleranza consentito, in fase di approssimazione, è determinato dal controllo di due parametri fondamentali: la divergenza, o *divergence*, cioè la distanza o scostamento tra due pannelli adiacenti, e l'angolo di piegatura, o *kink angle*, esistente tra i pannelli o tra le strisce di pannelli adiacenti. (fig.) L'algoritmo minimizza queste due variabili fino a raggiungere il grado di approssimazione della superficie ritenuto idoneo per l'ottimizzazione del processo.

In fase iniziale, l'algoritmo computa una soluzione composta interamente da pannelli piani. Nelle aree in cui le condizioni di curvatura non sono soddisfatte si procede a computare le forme di pannelli ritenute più adatte allo scopo.

Durante la prima fase, l'algoritmo calcola la curvatura gaussiana per ogni punto della superficie e scarta tutte le regioni con curvatura gaussiana positiva: tale operazione è necessaria per individuare un insieme di linee asintotiche (cfr. cap. V). L'algoritmo stima le direzioni asintotiche per un numero sufficiente di punti, lungo le quali allinea la superficie. Molto importanti risultano essere le funzioni di allineamento, che consentono di disporre e di distribuire correttamente i pannelli.¹²⁶ Le generatrici dei nuovi elementi a singola curvatura seguiranno la direzione delle curve asintotiche estratte,¹²⁷ le quali esistono proprio perché i punti considerati dall'algoritmo hanno solo curvatura gaussiana nulla o negativa.¹²⁸ Infine, l'algoritmo minimizza la somma dei quadrati delle distanze calcolate tra i punti delle tipologie di superfici scelte e quelli della superficie di ingresso.¹²⁹

Non è possibile utilizzare questo algoritmo per ottimizzare superfici che presentano degli spigoli (fig.6.89).¹³⁰

Tra i vantaggi derivanti dall'uso di questo algoritmo emerge sicuramente la possibilità di ridurre i costi di realizzazione per una percentuale pari anche al 50% del costo totale.¹³¹

E' inoltre importante sottolineare ulteriormente che, ai fini della re-

alizzazione di una superficie complessa, assume particolare importanza il sistema di curve attraverso cui la stessa viene discretizzata. Utilizzare una rete di curve coniugate, ed in particolare una rete di linee di curvatura principali, consente di ridurre la divergenza che c'è tra i pannelli curvi che discretizzano la superficie: tali curve consentono di approssimare nella migliore maniera possibile l'andamento della superficie complessiva. Infatti, a differenza dalle curve iso-parametriche, le linee di curvatura principale seguono e rappresentano esattamente la curvatura della superficie.¹³²

I matematici e gli informatici impegnati nel lavoro di traduzione algoritmica di questi principi stanno tentando di introdurre nuovi tipi di superfici tra il set di pannelli disponibili, tra cui, ad esempio, gli elicoidi sviluppabili.

Note

¹ cfr. M. Fassino, *La progettazione parametrica come strumento di analisi: dai pattern algoritmici decorativi ai pattern "performanti"*, esempi nei Beni Culturali, Tesi di Dottorato, tutor prof. Arch. A. Marotta, Politecnico di Torino, Dottorato di Ricerca in Beni Culturali, XXIV Ciclo, cap. 1, par. 1.1, p. 5

² Tra le tesi consultate in merito: M. Fassino, Op. cit.; L. Baglioni, *La Discretizzazione delle superfici continue*, Tesi di Dottorato, Tutors: Laura De Carlo, Riccardo Migliari, Università La Sapienza, Roma, Dottorato in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo, XXI ciclo

³ B. Grunbaum, G. C. Shephard, *Tilings by Regular Polygons. Patterns in the plane from Kepler to the present, including recent results and unsolved problems*, Mathematics Magazine, n.5, vol. 50, 1977

⁴ Le tassellature con simmetria periodica sono quelle per le quali esistono almeno due traslazioni indipendenti, dunque in direzione differente.

⁵ Una tassellatura è monoedrale se ogni tassello è congruente a qualsiasi altro tassello che compone una tassellatura, mentre è definita n-edrale se è composta da differenti tipi di tasselli. Se tutti i tasselli sono uguali la tassellatura si definisce isoedrale (cfr. M.Fassino, Op. cit., pp. 13-18)

⁶ L. Baglioni, *I poliedri regolari e semiregolari con un approfondimento sulle cupole geodetiche*, in R. Migliari, Geometria Descrittiva, Volume II – Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, p. 348

⁷ E. Capiato, *Il Pattern Geometrico*

⁸ cfr. M. Fassino, Op. cit., pp. 22-23

⁹ U. De Plaisant, *Il Disegno come strumento scientifico autonomo*, Seminari del Corso di Disegno, 1982-87, p.164

¹⁰ Ibidem, p.165

¹¹ M. Fassino, Op. cit., p. 24

- ¹² F. Fantini, *Teorie e tecniche della rappresentazione numerica o poligonale*, in R. Migliari, Geometria Descrittiva, Volume II – Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, p. 63
- ¹³ L. Baglioni, Op. cit., 402-422
- ¹⁴ Y. He, *Implementing Customized Metal Panels in Architectural Freeform Surfaces*, p.24
- ¹⁵ Ibidem, p.17
- ¹⁶ H. Schmiedhofer, S. Brell Cokcan, A. Schiftner, R. Ziegler, *Design and panelization of architectural free form surfaces by planar quadrilateral meshes*
- ¹⁷ U. De Plaisant, Op. cit., p.167
- ¹⁸ I modellatori attuali dispongono di appositi strumenti per la correzione di tali irregolarità.
- ¹⁹ D. Tonelli, *Sinossi sull' ingegneria delle forme libere*, Università di Pisa, Facoltà di Ingegneria, 2012, p.13
- ²⁰ M. Fassino, Op. cit.; L. Baglioni, *La Discretizzazione delle superfici continue*.
- ²¹ A. Schiftner, *Planar quad meshes from relative principal curvature lines*, Diploma Thesis, supervised by o. Univ-Prof. Dr. Helmut Pottman, Institute of Discrete Mathematics and Geometry Vienna University of Technology, p. 18
- ²² L. Baglioni, all'interno della suo contributo *Gli algoritmi informatici di meshing*, pp.404-422, in R. Migliari, Op. cit., elenca una serie di algoritmi esistenti per la generazione di mesh di tipo triangolare, tetraedrico, quadrangolare ed esaedrico.
- ²³ F. Fantini, Op. cit., p. 60
- ²⁴ D. Hambleton, C. Howes, J. Hendricks, J. Kooymans H. Yolles, *Study of Panelization Techniques to Inform Freeform Architecture*, GLASS PERFORMANCE DAYS 2009, pp. 1-2 - www.gpd.fi
- ²⁵ F. Fantini, Op. cit., p.72
- ²⁶ A. Schiftner, Op. cit., pag 18
- ²⁷ Ibidem, p.15
- ²⁸ P. Basso, *Optimal form-finding algorithms for the control of structural shapes*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria civile, tutor A. E. Del Grosso, Facoltà di Ingegneria, Università di Pavia, XXIV ciclo, 2012, pp109-112
- ²⁹ *food 4 Rhino. Apps for Rhino and Grasshopper*, <http://www.food4rhino.com/project/lunchbox?etx>
- ³⁰ F. Fantini, Op. cit., p.76
- ³¹ Edwin Catmull, (1978) è l'attuale presidente della Walt Disney Animation Studios e della Pixar Animation Studios
- ³² C. Loop (1987), attualmente lavora al dipartimento di ricerca e sviluppo della Microsoft
- ³³ D. Tonelli, Op. cit., p. 10
- ³⁴ U. De Plaisant, Op. cit., p.168
- ³⁵ Ibidem, p.10
- ³⁶ Team per lo sviluppo di *Kangaroo (app for Grasshopper)*: Robert Cervellione, Giulio Piacentino e Daniel Piker- <http://www.food4rhino.com/project/kangaroo?etx>
- ³⁷ In meccanica dei materiali, la legge di Hook è la più semplice relazione costitutiva di comportamento dei materiali elastici. Essa afferma che l'allungamento

subito da un corpo elastico è direttamente proporzionale alla forza ad esso applicata. La costante di proporzionalità viene detta costante elastica e dipende dalla natura del materiale stesso.

³⁸ A. Pugnale, *(Digital) form finding*, in *Arturo Tedeschi*, AAD_Algorithms – Aided Design, Le Penseur Publisher, 2014, pp. 353-359

³⁹ La costante k rappresenta il coefficiente elastico della molla, espresso in N/m

⁴⁰ Y.-L. Yang, Y.J. Yang, H. Pottmann, N. J. Mitra, *Shape Space Exploration of Constrained Meshes*, p.2

⁴¹ Tra gli strumenti per l'analysis surface, *Is planar* è un *component* di *Grasshopper* che consente di verificare se una superficie è piana, mentre il *component Planarity display* mostra il livello di planarità di una superficie.

⁴² L. Baglioni, Op. cit., pp. 348-350

⁴³ Ibidem

⁴⁴ M. Nieser, J. Palacios, K. Polthier, E. Zhang, Senior Member, *Hexagonal Global Parameterization of Arbitrary Surfaces*, IEEE Transactions on visualization and computer graphics, vol. 18, n. 6, giugno 2012, p. 865

⁴⁵ L. Baglioni, Op. cit., pp. 406

⁴⁶ M. Ciammaichella, *Artefatti in evoluzione. La rappresentazione matematica fra design generativo e pratiche numeriche*, Disegnare Con, 9 giugno 2012, p. 305

⁴⁷ Data la sua irregolarità e lo scopo della ricerca di gestire la discretizzazione delle superfici complesse attraverso reticoli regolari, la tassellazione di Voronoi non è stata indagata all'interno di questo studio.

⁴⁸ M. Nieser, J. Palacios, K. Polthier, E. Zhang, Senior Member, Op. cit., p. 865

⁴⁹ L. Baglioni, Op. cit., p.359

⁵⁰ J. Liu, S. Li, Y. Chen, *A fast and practical method to pack spheres for mesh generation*, Acta Mechanica Sinica, August 2008, Volume 24, Issue 4, Springer, 2008, pp 439-447

⁵¹ M. Hobinger, *Packing circles and spheres on surfaces*, Diploma Thesis, supervised by o. Univ-Prof. Dr. H. Pottmann, Institute of Discrete Mathematics and Geometry Vienna University of Technology

⁵² cfr. A. Papadopoulos, *Handbook of Teichmüller Theory*, Volume 2, EMS Publishing House, Zurich, 2009, p 30

⁵³ cfr. Ibidem

⁵⁴ M. Hobinger, Op. cit.

⁵⁵ Gli algoritmi di *Circular* o *Spherical packing*, computano il risultato basandosi sulla legge dei coseni.

⁵⁶ M. Hobinger, Op. cit.

⁵⁷ Ibidem

⁵⁸ Per triangolare la superficie è stato utilizzato l'*add-on Lunch Box* di *Grasshopper*

⁵⁹ P. Basso, Op. cit., p.159

⁶⁰ D. Tonelli, Op. cit.

⁶¹ D.Tonelli, *Progettare Involucri di Forma Libera: Ingegnierizzazione dell'Involucro*, Università di Pisa, Facoltà di Ingegneria, maggio 2013

⁶² S. Leggerini, *La Natura non spreca energie. Architettura e bolle di sapone. Otto Frei e Chris Bosse*, UTEM, 2010

⁶³ A.Vytisková, *Diskrétní reprezentace ploch volného tvaru v architektonické geometrii*, (trad. *Discrete representations of free-form shapes in architectural geometry*), advisor M. Lávička, Diplomová Práce, 2013, p. 46

⁶⁴ H.Pottmann, *Architectural Geometry and Fabrication-Aware Design*, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Saudi Arabia, p. 5

⁶⁵ A.Vytisková, Op. cit.,p.43

⁶⁶ *plug-in Evolute Tools Pro - Rhinoceros*

⁶⁷ M.Nieser, J. Palacios, K. Polthier, E. Zhang, Senior Member, Op. cit.,p.865

⁶⁸ C. Troche, *Planar hexagonal mesh by Tangent plane Intersection*, in Advances in Architectural Geometry 2008, pp. 57-60

⁶⁹ Wang (2008-2009)

⁷⁰ Questo algoritmo, riportato in H. J. Zimmer, *Optimization of 3D Models for Fabrication*, Diplom - Informatiker, pp. 26-27, non viene trattato perché basato su principi matematici molto specifici, che esulano da questa trattazione.

⁷¹ A. Bagger, *Facetted Shell Structure of Glass*, Technical University of Denmark http://www.annebagger.dk/files/manager/publikationer/facetted_shell_structures_of_glass_anne_bagger.pdf

⁷² cfr. Cap. II

⁷³ cfr. Cap. V

⁷⁴ R. Sauer, *Differenze geometrie*, Springer, 1970, Berlin

⁷⁵ Glymph et al. (2002) - Polthier (2002), Suris (2005), Desbrun (2005), e Hildebrandt (2005) - Liu et al. (2006) - Pottmann et. al. (2008) - Zadavec et al. (2010) – Questo elenco è stato estratto da L. Baglioni, *Nuove applicazioni della geometria descrittiva: le PQ mesh nell'architettura contemporanea*, in Disegnare con, 9 giugno 2012, p. 272

⁷⁶ A. I. Bobenko, Y. Suris, *Discrete Differential Geometry: Integrable structure*, Volume 98 of Graduate Studies in Mathematics, American Mathematical Society, 2008

⁷⁷ Y. Liu, H. Pottmann, J. Wallner, Y.-L. Yang, W. Wang, *Geometric Modeling with Conical Meshes and Developable Surfaces*, in ACM Trans. Graphics, Vol 25 n.3 2006, pp 681-689.

⁷⁸ Y. Liu, W. Xu, J. Wang, L. Zhu, B. Guo, F. Chen, G. Wang, *General Planar Quadrilateral mesh Design using conjugate direction field*, p. 1

⁷⁹ Cfr. cap V

⁸⁰ A.Schiftner, Op. cit., p 41

⁸¹ L. Baglioni, Op. cit., pp 276-277

⁸² Y. Liu, H. Pottmann, J. Wallner, Y.-L. Yang, W. Wang, Op. cit., p 4

⁸³ Ibidem

⁸⁴ Ibidem, p 2

⁸⁵ M. Zadavec, A. Schiftner, J. Wallner, *Designing Quad-dominant Meshes with Planar Faces*, pp 3-4

⁸⁶ Ibidem

⁸⁷ Pottmann et al. (2007); Eigensatz et al. (2010)

⁸⁸ Y. Liu, W. Xu, J. Wang, L. Zhu, B. Guo, F. Chen, G. Wang, Op. cit., p. 9

⁸⁹ Y.-Liang, Y. Yi, J. Yang, H. Pottmann, N.J. Mitra, Op. cit., p. 2

⁹⁰ Ibidem, pp.8-10

⁹¹ L. Baglioni, Op. cit., pp.276-277

⁹² M. M. Martin et al. (1986)

⁹³ Yuri B. Suris (2005)

⁹⁴ L. Baglioni, Op. cit., p.272

⁹⁵ Y. Liu, H. Pottmann, J. Wallner, Y.-L. Yang, W. Wang, *Geometric Modeling with Conical Meshes and Developable Surfaces*, p. 2-4

⁹⁶ Ibidem, p.5

⁹⁷ Il risultato è influenzato dalla curvatura della superficie

⁹⁸ Y. Liu, H. Pottmann, J. Wallner, Y.-L. Yang, W. Wang, Op. cit., p.5

⁹⁹ cfr. Cap. V

¹⁰⁰ Y. Liu, H. Pottmann, J. Wallner, Y.-L. Yang, W. Wang, Op. cit., p.6

¹⁰¹ Wunderlich (1951)

¹⁰² *Ibidem*

¹⁰³ L. Baglioni, *Op. cit.*, p. 276-277

¹⁰⁴ cfr. J. Wallner, H. Pottmann, C.C.Tang, X. Sun, A. Gomes, *Form-finding with Polyhedral Meshes Made Simple*, King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), 2014

¹⁰⁵ Y. Liu, H. Pottmann, J. Wallner, Y.-L. Yang, W. Wang, *Op. cit.*, p 8

¹⁰⁶ H. Pottmann, Y. Liu, J. Wallner, A. Bobenko, W. Wang, *Geometry of Multi-layer Freeform Structures for Architecture*, in ACM Trans. Graphics, Vol 26, n.3, 2007, p.3

¹⁰⁷ L. Baglioni, *Op. cit.*, p.272

¹⁰⁸ H. Pottmann, Y. Liu, J. Wallner, A. Bobenko, W. Wang, *Op. cit.*, p.5

¹⁰⁹ H. Pottmann, Y. Liu, J. Wallner, A. Bobenko, W. Wang, *Op. cit.*

¹¹⁰ L. Baglioni, *Op. cit.*, p 271

¹¹¹ *Ibidem*

¹¹² D. Hambleton, C. Howes, J. Hendricks, J. Kooymans, H. Yolles, *Study of Panelization Techniques to Inform Freeform Architecture*, Architectural Challenges & Solutions, Glass Performance Days, 2009, p 2

¹¹³ L. Baglioni, Op. cit., p 271

¹¹⁴ Il grande Dizionario Garzanti della Lingua italiana, Garzanti Editore

¹¹⁵ A. Vytisková, *Op. cit.*, pp.53-56

¹¹⁶ Y. Liu, H. Pottmann, J. Wallner, Y.L. Yang, W. Wang, *Geometric Modeling with Conical Meshes and Developable Surfaces*, p.5

¹¹⁷ cfr. cap.V della presente tesi

¹¹⁸ F. Fallavolita, *La costruzione di una superfici rigata generica*, in R. Migliari, *Geometria Descrittiva*, Volume II - Tecniche e Applicazioni, p. 161

¹¹⁹ *Ibidem*, p. 161

¹²⁰ Y. Liu, H. Pottmann, J. Wallner, Y.L. Yang, W. Wang, *Op. cit.* pp 2-8

¹²¹ H. Pottmann, A. Schiftner, P. Bo, H. Schmiedhofer, W. Wang, N. Baldassini, J. Wallner, *Freeform surfaces from single curved panels*, pp 2-4

¹²² *Ibidem*, p.5-7

¹²³ R. F. Riesenfeld è professore, co-direttore del Geometric Design and Computation Group con Elaine Cohen, della School of Computing, University of Utah, Salt Lake City, UT

¹²⁴ H.Pottmann, A. Schiftner, P. Bo, H. Schmiedhofer, W. Wang, N. Baldassini, J. Wallner, *Op. cit.*, p.8
¹²⁵ Il modulo *Panel Fitting* è ancora soggetto a restrizioni dal punto di vista divulgativo e commerciale
¹²⁶ Y. Liu, H. Pottmann, J. Wallner, Y. L. Yang, Wenping Wang, *Op. cit.* , p.8
¹²⁷ D. Tonelli, *Op. cit.*, pp. 7-8
¹²⁸ H. Pottmann¹, A.Schiftner, J. Wallner³, *Geometry of Architectural Freeform Structures*, Internat. Math. Nachrichten, n. 209 (2008), pp.15–28
¹²⁹ D. Tonelli, *Op. cit.*
¹³⁰ M. Eigensatz, Deuss M., Schiftner A., Kilian M., Mitra N. J., Pottmann H., Pauly M., *Case Studies in Cost-Optimized Paneling of Architectural Freeform Surfaces*, p 22
¹³¹ D. Tonelli, *Op. cit.*, pp. 7-8
¹³² H. Pottmann, A. Schiftner, J. Wallner, *Op. cit.*,pp. 15–28

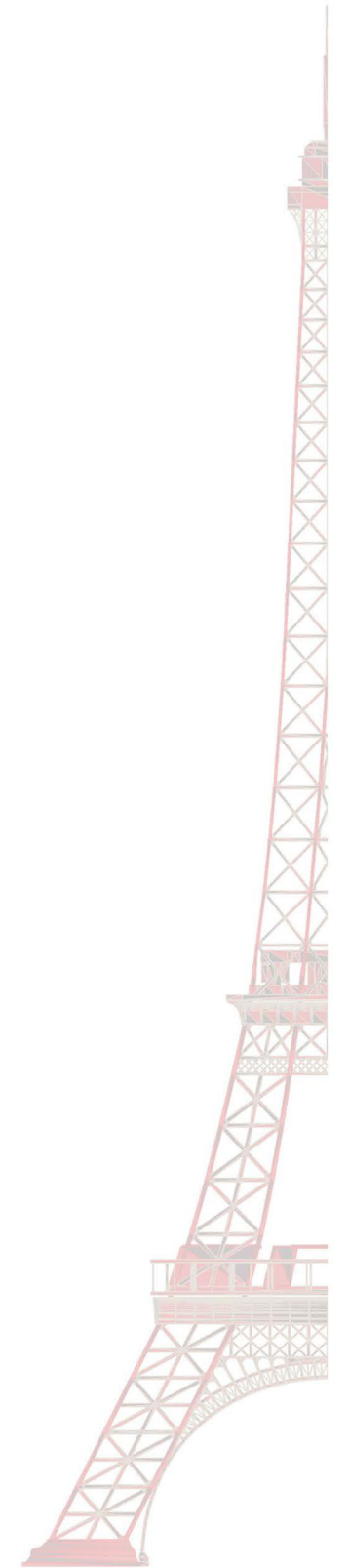
Caso studio.
Le facciate degli *Eiffel Tower Pavilions*:
un sistema portato

7.1 Gli *Eiffel Tower Pavilions*

Le facciate degli *Eiffel Tower Pavilions*, i padiglioni progettati dallo studio *Moatti & Rivière architectes* per la ristrutturazione del primo piano della Torre Eiffel, rappresentano un caso emblematico di ottimizzazione geometrica e costruttiva di superfici complesse. Basato su un approccio geometrico rigoroso, il caso si configura come un esempio capace di soddisfare esigenze architettoniche ed economico-ambientali avanzate, in quanto inserito all'interno di un monumento storico prestigioso come la Torre Eiffel.

Helmut Pottmann definisce il progetto delle facciate degli Eiffel Tower Pavilions “una perfetta realizzazione dei risultati principali dell'approccio ARC (*Architectural Freeform Structures from Single Curved Panels*), una vera e propria lezione di Geometria Differenziale applicata.”¹

L'evidente volontà di instaurare un dialogo tra la forma e il contesto rappresenta un elemento caratteristico del progetto che offre spunti di riflessione stimolanti e originali. Le forme libere, solitamente giudicate totalmente estranee rispetto all'ambiente nel quale sono inserite, rappresentano proprio l'elemento di collegamento tra il vecchio ed il nuovo. Le condizioni di vincolo imposte dal contesto veicolano il processo di ideazione formale: infatti, in una location in cui l'area di intervento è chiaramente delimitata, è stato necessario computare la soluzione al millimetro.



Parte del contributo di questa tesi è riposta nell'indagine di casi studio che rappresentano delle buone pratiche di riferimento per la definizione di un approccio sostenibile. Questa esigenza ha necessariamente richiesto il coinvolgimento di diverse figure nel processo, che ha consentito di definire una soluzione ottimale dal punto di vista costruttivo. L'esperienza ha dimostrato come in questo caso si manifesti l'inevitabile esigenza dell'architetto di affidarsi nelle mani di tecnici esperti e specializzati.

Dall'analisi del campione è emersa una scarsa quantità di involucri o di facciate realizzati mediante la distribuzione di pannelli a singola curvatura o mediante la computazione di sistemi semi-discreti.

Inoltre, come dimostrato, la fabbricazione di superfici complesse comporta numerose criticità legate alle proprietà dei materiali, allo sviluppo di tecnologie di fabbricazione apposite e ai conseguenziali costi di fabbricazione elevati, talvolta causando un elevato dispendio delle risorse, dovuto all'eventuale rottura degli elementi sottoposti a sollecitazione ed alla necessità di produrre un elevato numero di stampi differenti. (cfr. cap. IV)

Le facciate degli *Eiffel Tower Pavilions* rappresentano un caso di pannellizzazione di superfici complesse realizzate mediante l'assemblaggio di pannelli cilindrici.

Tra le motivazioni che hanno orientato la scelta verso questo caso studio emergono, inoltre, le avanzate ed innovative sperimentazioni di paneling condotte dal gruppo Evolute GmbH in collaborazione con il gruppo RFR Paris per l'ottimizzazione delle superfici.

Le superfici a doppia curvatura, la cui forma è stata "abbozzata" dall'architetto, sono state suddivise in elementi prefabbricati a singola curvatura, ed in particolare in pannelli cilindri. La rete delle linee di curvatura principale estratta dalla superficie delimita la dimensione di ciascuno dei pannelli. Come dimostrato (cfr. cap. IV), la realizzazione di superfici rigate, ed in alcuni casi sviluppabili, ottimizza l'intero approccio dal punto di vista costruttivo, economico ed estetico, rendendo possibile il molteplici uso di uno stesso stampo per la fabbricazione di numerosi pannelli aventi la stessa curvatura.

Da sempre, infatti, la maggiore semplicità di fabbricazione di queste superfici sostiene gli architetti e gli artisti la cui espressività è legata alla progettazione di forme curve e complesse (cfr. cap. I). L'elevata qualità del risultato ottenuto per la razionalizzazione delle facciate è assicurata dalla computazione della distribuzione e del raccordo

globale tra i pannelli. Grazie alle ricerche e agli strumenti recentemente diffusi da Evolute, gli *Evolute Tools*,² è possibile approcciare, in maniera applicativa, all'analisi e alla gestione di tali problematiche.

7.2 L'evoluzione del primo piano della Torre Eiffel

Il primo piano della Torre Eiffel, posto ad una quota di 57 metri al di sopra del suolo della città di Parigi, è stato più volte oggetto di interventi di manutenzione e di ristrutturazione. Il recente progetto di riqualificazione realizzato dallo studio Moatti & Rivière ed inaugurato dal sindaco di Parigi, Anne Hidalgo, nel recentissimo ottobre 2014, ha previsto la demolizione e ricostruzione dei due padiglioni *Eiffel* e *Ferrière*, e del padiglione "58 Tour Eiffel", noto per la sua funzione di ristorante. Dopo 125 anni di storia, è interessante riportare gli interventi che hanno determinato l'evoluzione del primo piano del più celebre monumento parigino.³

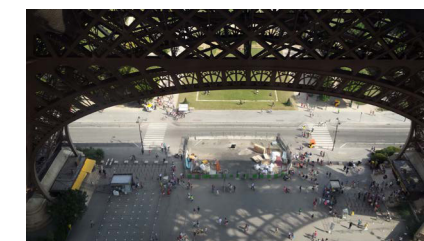
Il progetto della Torre Eiffel venne presentato da Gustave Eiffel in occasione dell'Esposizione Mondiale del 1889. L'evento era stato organizzato per la celebrazione del centenario della Rivoluzione francese con l'obiettivo di promuovere un progetto di ripresa economica. L'impresa Eiffel era, al tempo, già nota per la realizzazione di diversi viadotti metallici in Europa e nel mondo.

Maurice Koechlin, ingegnere strutturale e principale responsabile dell'ufficio di progettazione, ed Emile Nouguier, architetto e ingegnere civile, proposero un progetto il cui scopo era esaltare la modernità ed il successo industriale: una torre interamente in ferro, alta oltre 300 metri. Dopo aver vinto il concorso Gustave Eiffel dedicò tutte le sue energie ed i suoi fondi per lo sviluppo di questo progetto.⁴ Le maggiori preoccupazioni di Eiffel erano soprattutto legate al riconoscimento del valore scientifico e strategico dell'opera.

Fin dal primo momento, il monumento fu oggetto di critiche e di petizioni mosse dalla stampa e dagli artisti dell'epoca.

Tuttavia, le obiezioni furono rapidamente spazzate via dal conseguente successo riportato. Nonostante le incertezze di carattere finanziario, legate alla gestione ed alla manutenzione abbiano spesso indotto a valutare la possibilità di demolire la Torre, la nascita di un forte turismo di massa ne ha garantito la sopravvivenza.

Il notevole successo riscosso durante tutto il XX secolo ha pertanto





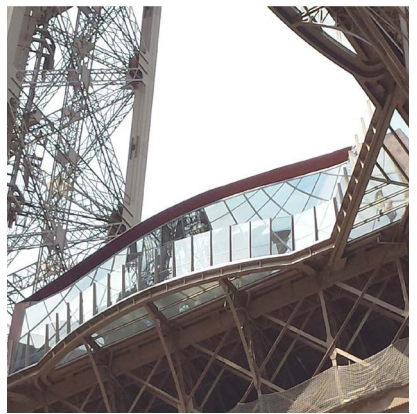
a



b



c



d

7.1-Evoluzione del primo livello della Torre Eiffel
a. 1889
b. 1937
c. 1980
d. 2014

da sempre incoraggiato un regolare, anche se dispendioso, lavoro di manutenzione e di miglioramento delle attrezzature e dei servizi legati al monumento.

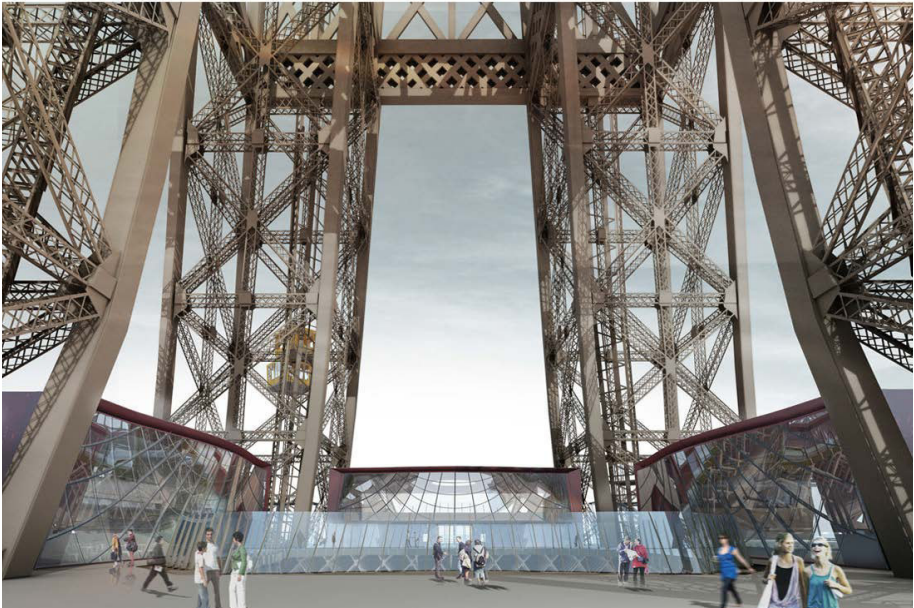
Nel 1889, la decorazione eccessiva dei padiglioni all'epoca esistenti al primo piano tendeva a "confondersi" con gli elementi metallici della Torre. A tal proposito, in occasione del Salone Internazionale del 1937, l'architetto André Granet decise di ridurre l'importante presenza della galleria e dei padiglioni originari, soprattutto allo scopo di liberare la vista panoramica fruibile dal primo piano. Inoltre, sostituì le strutture di accoglienza, poste ai piedi di ogni pilastro, prevedendo l'inserimento di ascensori più capienti (oggi ancora in uso), e gestendo l'intera ricostruzione mediante la realizzazione di altre opere di completamento, tra cui il sistema di balaustre necessarie per la messa in sicurezza del livello.⁵

Nel 1980, si ebbe un secondo intervento di ristrutturazione, ad opera dell'architetto Francois Dhôtel: giocando con effetti riflettenti, dovuti alla realizzazione di facciate a specchio e di elementi rifiniti utilizzando una vernice tono su tono,⁶ cercò di fondere i nuovi padiglioni con la struttura della Torre. In tale occasione, l'accoglienza del pubblico e la messa in sicurezza del sito imposero nuovamente la realizzazione di appositi dispositivi di accesso, da cui la realizzazione di un nuovo volume inserito ai piedi del pilastro ovest (lato del Champ de Mars) in cui inserire la biglietteria e il locale di accesso agli ascensori, mentre il precedente volume realizzato da Granet venne utilizzato per consentire l'uscita dei visitatori.⁷

Nel 2011, per migliorare i servizi di accoglienza e per incoraggiare la sosta dei turisti al primo livello della Torre è stata nuovamente prevista la ricostruzione dei tre padiglioni.

Il concorso, organizzato dalla SETE (*Torre Eiffel Operating Company*), è stato vinto da un partenariato guidato dall'agenzia *Moatti & Rivière Architectes*, in collaborazione con *BATEG*.⁸

In particolare, il progetto ha previsto la demolizione e la ricostruzione dei due padiglioni *Eiffel* e *Ferrié*, mentre il terzo padiglione, che ospita il ristorante *58 Tour Eiffel*, è stato stilisticamente conformato agli altri due.⁹ Immersi tra i pilastri delle colonne di metallo, le tre nuove strutture dei padiglioni sono composti da una facciata di forma complessa realizzata interamente in vetro ancorata ad un involucro-scatoia la cui pelle è stata tinteggiata in lamiera marrone e rossa, in memoria dell'originario colore della Torre Eiffel.¹⁰



7.2

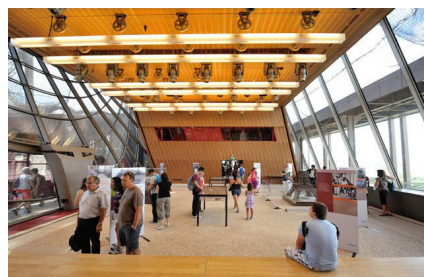


a



b

7.3 - Il padiglione *Eiffel*.
7.4a,b - Il rapporto con il contesto.



7.5 - La sequenza di immagini (in alto) mostra l'interno del Padiglione *Eiffel*.



7.6 - Fasi di cantiere
7.7 - L'intervento ha richiesto lo sviluppo di appositi sistemi di cantierabilità

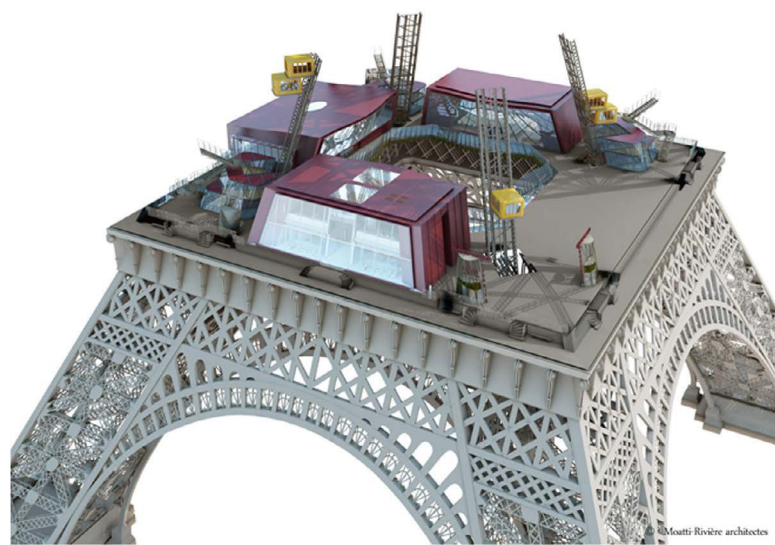
Le facciate dei nuovi padiglioni seguono l'andamento curvo e ascendente del monumento.

All'interno dei padiglioni, le pavimentazioni e le rifiniture di ogni unità sono realizzate in legno, mentre il vetro, oltre che per la realizzazione delle facciate, è stato utilizzato sia per la pavimentazione del percorso posto intorno all'affaccio centrale, sia per le balaustre necessarie per la messa in sicurezza dell'intero livello, in modo da favorire la creazione di nuovi punti di vista e generando la sensazione di essere sospesi nel vuoto. Quest'ultimo accorgimento attira l'attenzione di tutti i visitatori, puntualmente divertiti o spaventati da tale soluzione, e consente allo spettatore di rivolgere lo sguardo verso due possibili direzioni: dal basso verso l'alto, cioè dalla città alla Torre, e dall'alto verso il basso, dalla torre alla città. L'idea è quella di trasformare la semplice visita del monumento in un'esperienza culturale e sensoriale.

Il progetto ha previsto, inoltre, la realizzazione di apposite cabine dedicate alle informazioni turistiche, di *boutiques* e di diverse attrazioni: tutto il primo piano sembra essere un piccolo centro urbano sospeso alla quota di 57 metri al di sopra del suolo della città.¹¹

La demolizione ed il trasporto in quota dei materiali hanno richiesto lo sviluppo di appositi sistemi di cantierabilità.

L'intero progetto di ricostruzione dei padiglioni è stato esaminato



dalla *Commission du vieux Paris*, nel rispetto dell'importante contesto all'interno del quale esso è inserito.¹²

Più nel dettaglio, la ricostruzione del padiglione *Eiffel* (lato Nord/Est) ha previsto la creazione di una sala di ricevimento/conferenze dedicata allo svolgimento di eventi professionali, dotata di ingresso, *reception*, uffici e aree di servizio, mentre la ricostruzione del padiglione *Ferrié* (lato sud/ovest) ospita i servizi per i visitatori, tra cui aree dedicate all'organizzazione di eventi, ristoranti e negozi: in sintesi, un ambiente dedicato all'intrattenimento e al relax.

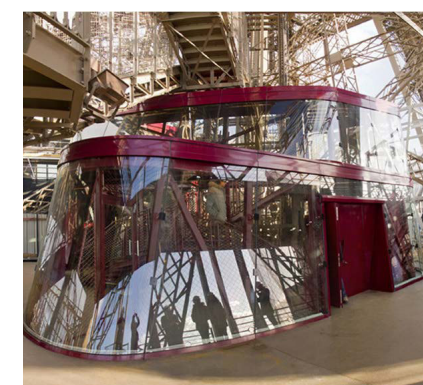
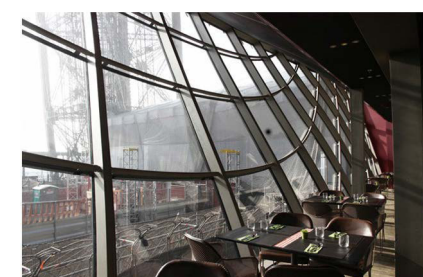
L'intervento comprende la riorganizzazione degli spazi pubblici esterni: il progetto delle nuove cabine di accoglienza realizzate a completamento dei tre ascensori che consentono l'accesso al primo piano è in linea con il linguaggio utilizzato per i padiglioni.

Inoltre, è prevista la creazione di un percorso museografico, sviluppato mediante la realizzazione di appositi supporti, chioschi, schermi, oggetti *touch screen* e album digitali distribuiti all'aperto su tutto il livello.¹³ L'allestimento è stato ideato per raccontare delle celebri esposizioni universali del passato e dell'importante ruolo che il celebre monumento ha occupato nella storia: tale percorso culturale si estende all'interno del padiglione *Ferrié*, con la possibilità di assistere ad uno spettacolo immersivo che utilizzerà il pavimento e la parete della struttura come supporti attraverso cui fruire virtualmente la Torre e la città, sperimentando la caduta, la scalata, ed il camminamento sulle sue travi.¹⁴

Il progetto di riqualificazione del primo piano della Torre Eiffel è stato esposto, nel 2012, alla 13° Biennale di Architettura di Venezia, in occasione della quale è stata allestita una mostra completa di foto, disegni, sketch, video e modelli del progetto.¹⁵

Tra i principali obiettivi, il progetto mira a migliorare il rendimento energetico del sistema: durante i mesi estivi, la facciata ridurrà la dissipazione del calore proveniente dagli ambienti interni delle strutture di almeno il 25%.¹⁶

Inoltre, sulla copertura del padiglione *Ferrié* sono stati installati quattro pannelli fotovoltaici per la produzione di acqua calda, che coprirà, in media, il 50% degli importi richiesti per ognuno degli edifici e saranno installate quattro turbine eoliche ed un sistema di raccolta dell'acqua piovana per la fornitura dei servizi igienici.¹⁷



7.8 - Padiglione 58 (ristorante). Vista interna.
7.9 - Particolare.
7.10a,b - Le nuove cabine di accoglienza realizzate a completamento degli ascensori.



7.11 - La facciata: superficie a doppia curvatura.
7.12 - Il profilo dei padiglioni è influenzato dalla geometria e dall'inclinazione dei pilastri.

7.3 Il progetto: un contesto “magnetico”

Il profilo delle scatole in lamiera rossa dei padiglioni *Eiffel*, *Ferrié* e del *padiglione 58* è visibilmente influenzato dalla geometria dei pilastri inclinati della Torre, la cui forza ascendente sembra attirare verso l'alto l'intero sistema delle facciate.

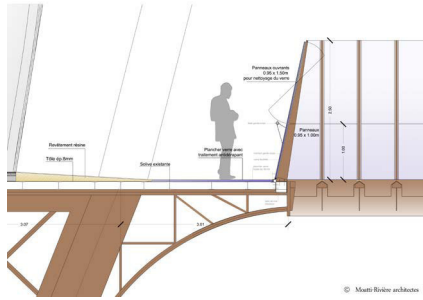
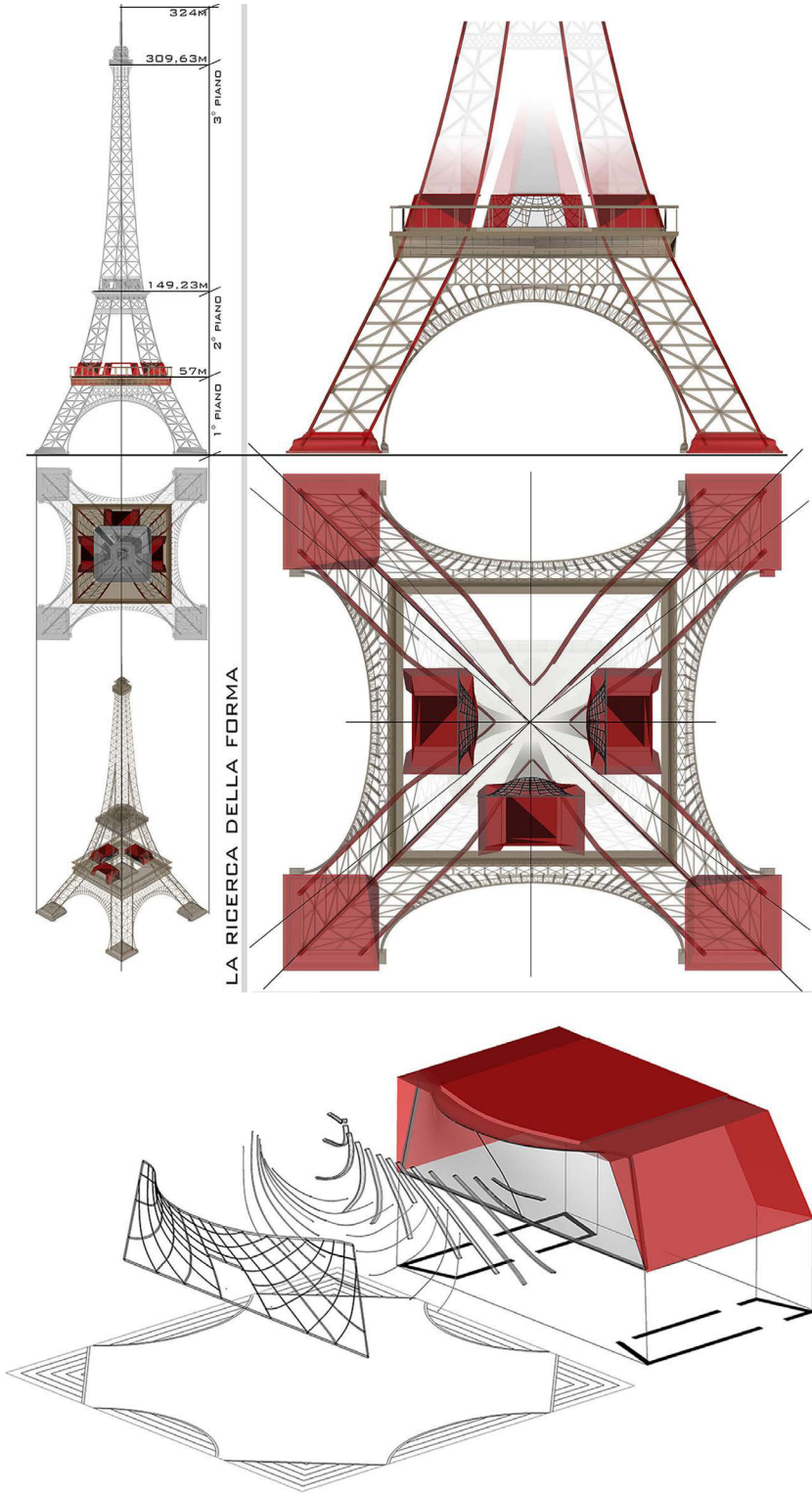
Anche la balaustra, alta 2,5 metri e inclinata verso il vuoto, segue l'inclinazione dei pilastri.¹⁸ Grazie all'uso innovativo dei materiali, consentito dall'impiego di sofisticati programmi di calcolo, è stato dunque possibile legare l'intero progetto al dinamismo della torre.

A tal proposito, è importante approfondire il ruolo svolto dalla figura dell'architetto all'interno del processo.

Lo studio *Moatti & Rivière* è rinomato per la sua capacità di lavorare a contatto con siti carichi di storia: rispettandone l'identità, mira a donare loro un look contemporaneo ed innovativo, combinando realtà, immaginazione e simbolismo.²⁰

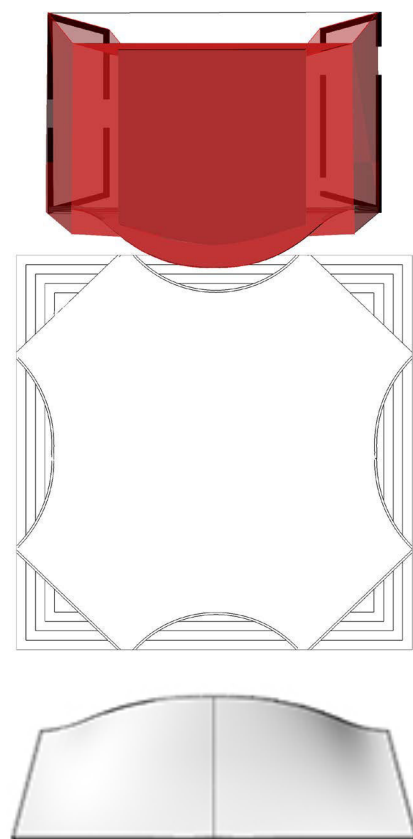
Da sempre, la storia dei luoghi rappresenta il punto di partenza di tutti i loro progetti, in Francia come all'estero. All'interno della *Moatti-Rivière agence*, a Parigi, è possibile apprezzare un modello in scala dell'intero progetto di ristrutturazione del primo piano della Torre Eiffel. Per Alain Moatti, *architecte co-fondateur de l'Agence Moatti-Rivière* (2001) insieme all'architetto Henry Rivière,¹⁹ ristrutturare il primo piano della Tour Eiffel ha rappresentato un'emozionante occasione grazie alla quale è stato possibile misurarsi con uno degli edifici più famosi del mondo. In sintesi, sulla base delle indicazioni dell'architetto, sono stati “schizzati” la forma e l'andamento della superficie. Successivamente, sono stati necessari numerosi *steps* di ottimizzazione della forma: le diverse soluzioni sono state, volta per volta, puntualmente verificate attraverso l'analisi della curvatura gaussiana e l'estrazione delle linee di curvatura principale dalle diverse superfici generate. La rete delle linee di curvatura della soluzione finale, dotata di una rete di curve regolare e priva di punti di singolarità, era inizialmente molto densa, simile alla griglia di una carta millimetrata deformata. Per posizionare l'ingresso e per stabilire l'esatta dimensione e quantità dei pannelli, il *pattern* finale di suddivisione è stato definito in collaborazione con l'architetto.²¹

Come confermato da Alain Moatti durante l'intervista, da questo momento in poi termina la partecipazione attiva del progettista alle successive fasi del processo.



7.13 - Il modello mostra l'inserimento dei padiglioni nel contesto e il sistema della facciata.
7.14 - Sezione di progetto.
7.15 - Come i padiglioni, anche la balaustra segue l'inclinazione dei pilastri

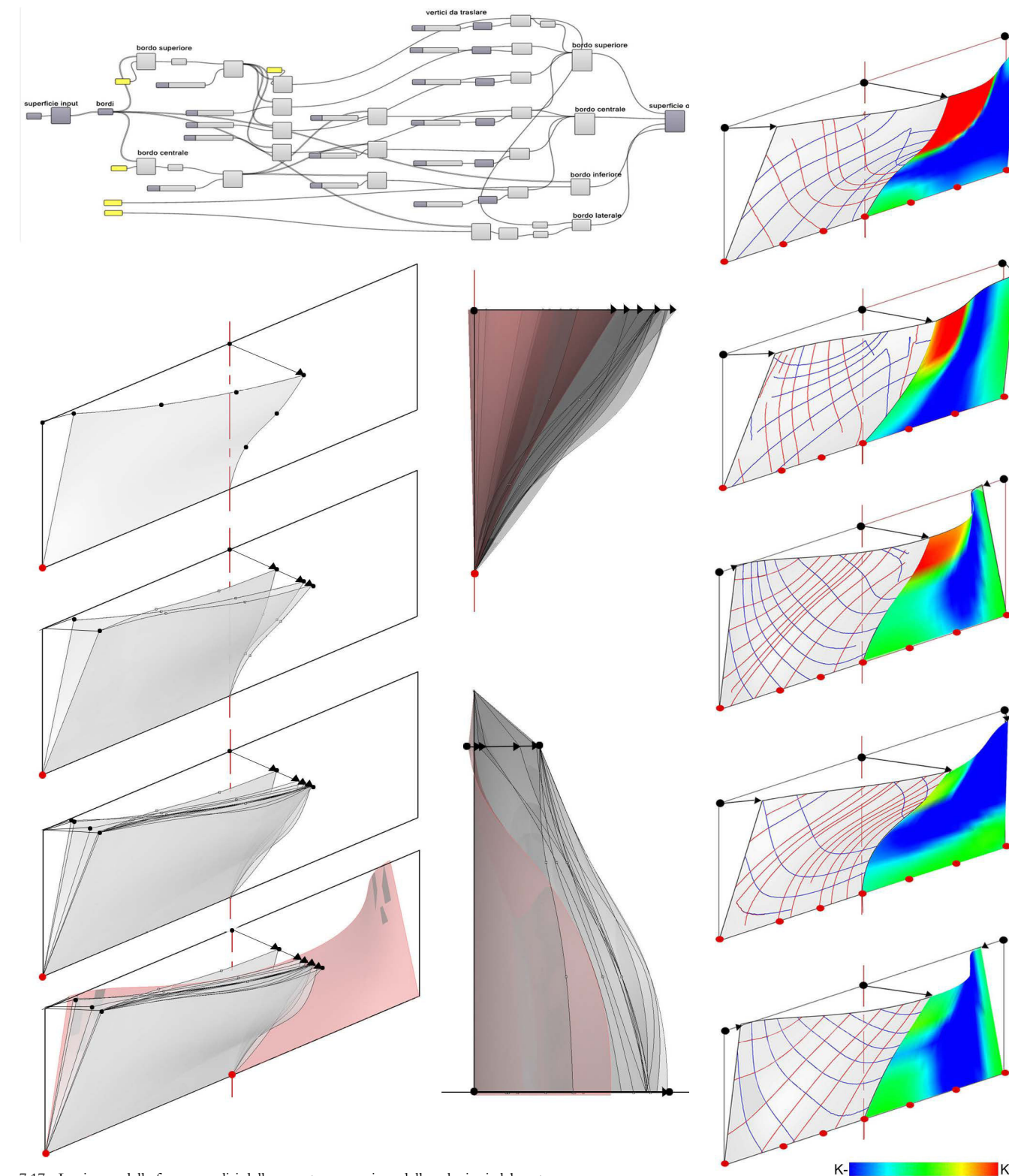
7.4 La forma delle facciate: ottimizzazione e discretizzazione



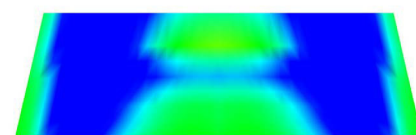
7.16 -. La forma della superficie segue il profilo curvo del vuoto centrale di affaccio del primo livello della Torre.

Le tre facciate degli *Eiffel Pavilions* rappresentano una nuova sfida nel campo della realizzazione di pelli vetrate di forma complessa. Alla figura dell'architetto e dell'ingegnere si uniscono le figure dei matematici e degli informatici, le cui competenze sono necessarie per tradurre le volontà progettuali in un linguaggio comprensibile alle macchine in fase di realizzazione. Il gruppo di ingegneri di RFR Paris ed il gruppo di matematici ed informatici, i geometry experts di Evolute GmbH, hanno studiato un'apposita soluzione di pannellizzazione per riprodurre fisicamente la curvatura e la continuità delle superfici, limitandone il più possibile i costi di fabbricazione: la facciata è stata, dunque, interamente discretizzata con pannelli cilindrici. Scopo del lavoro affrontato all'interno di questo capitolo è quello di ripercorrere, in maniera consapevole, le tappe necessarie per l'ottimizzazione della forma e necessarie per la computazione del sistema finale. La Geometria, a tal proposito, rappresenta lo strumento principale attraverso cui tradurre ed esplicitare il linguaggio implicito della matematica e dell'informatica. Tuttavia, gli ingegneri coinvolti nel processo affermano che l'astrazione geometrico-matematica dei processi è puntualmente ed inevitabilmente condizionata dalle leggi e dalle proprietà chimiche e fisiche dei materiali e delle tecnologie di fabbricazione e di montaggio necessarie per la fattibilità di un progetto. Per comprendere le problematiche connesse al processo di ottimizzazione si ritiene utile ripercorrere tutte le tappe che hanno consentito di giungere alla soluzione finale.

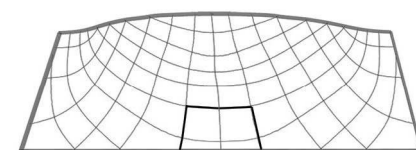
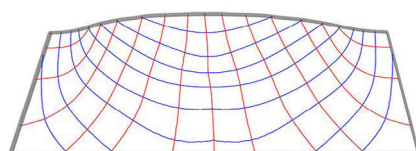
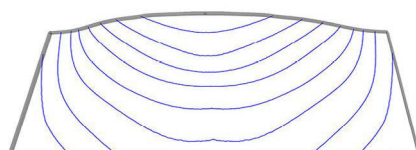
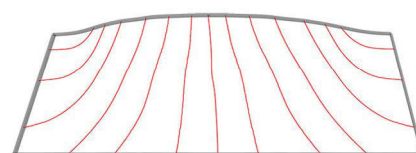
Dunque, il primo obiettivo è stato quello di ricavare la superficie da cui estrarre una rete regolare di curve coniugate, ed in particolare di linee di curvatura principale.²² Il modello è stato realizzato con *Rhinoceros*. Per ricavare la superficie (una *patch*) sono state tracciate delle curve coincidenti con i profili delle scatole di lamiera precedentemente modellate seguendo l'inclinazione dei pilastri della Torre. La distanza tra la curva di base e quella superiore è pari a 8,00 m,²³ distanza corrispondente all'altezza effettiva delle facciate, mentre l'angolo di inclinazione delle pareti della "scatola" è pari a circa 14°. La curva superiore segue, secondo le intenzioni indicate dal progettista, il profilo del vuoto centrale di affaccio del primo livello (fig. 7.16) Quindi, le curve di bordo sono state suddivise in punti, di cui par-



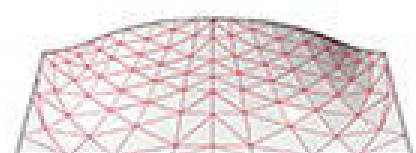
7.17 - La ricerca della forma: analisi della curvatura gaussiana delle soluzioni elaborate.



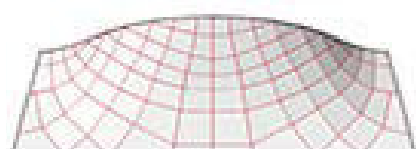
K- K+



7.18



7.19



7.20

te sono stati vincolati, in particolare quelli appartenenti al bordo di base, e parte sono stati traslati più volte allo scopo di ricavare diverse soluzioni formali (fig.7.17). Tutte le modifiche sono state eseguite rispettando la condizione di simmetria della forma, proprietà che favorisce l'ottimizzazione dell'intero processo.

Attraverso tale tecnica, anche le minime traslazioni dei punti hanno prodotto importanti variazioni nella curvatura, dimostrate dalla maggiore o minore regolarità del pattern delle linee di curvatura principale estrapolate. Le diverse soluzioni formali ricavate sono state verificate attraverso l'analisi della curvatura gaussiana, strumento *Analisi curvatura* di *Rhino*, e attraverso l'estrazione delle rispettive reti di curve, resa possibile dallo strumento *et_principale curvature lines* (*Evolute Tools Pro* - *Rhino*).

La consapevolezza del raggiungimento di una soluzione prossima a quella effettivamente realizzata deriva dal confronto delle soluzioni elaborate con i grafici di analisi della curvatura gaussiana pubblicati dai professionisti coinvolti nel processo²⁴ e dalla conseguente estrazione di una rete regolare di curve, dunque priva di punti di singolarità (fig. 7.18). La rete delle linee di curvatura è visibile nell'edificio in quanto coincide con gli elementi strutturali del sistema.

Pertanto, è importante che la forma sia progettata dall'architetto in maniera consapevole, al fine di prevedere la distribuzione di tali curve "nascoste" all'interno della forma mediante l'osservazione del grafico della curvatura gaussiana della superficie. Inoltre, le celle individuate dall'intersezione delle curve rappresentano il pattern di distribuzione dei pannelli sulla superficie.

Il ricorso a queste reti di curve consente, in fase di discretizzazione, di assecondare il più possibile la curvatura e la forma della superficie originaria. Per razionalizzare la superficie sono state sperimentate diverse soluzioni di *paneling*. E' noto che il modo più economico per realizzare una superficie free form in vetro è di utilizzare pannelli piani: il pattern triangolare rappresenta la tecnica di razionalizzazione più immediata. Per ricavare tale soluzione, si procede con il tracciare le diagonali delle celle quadrilateri individuate dalla rete di linee di curvatura (fig.7.19). Tuttavia, il *pattern* quadrangolare permette la realizzazione di nodi strutturali privi di torsione ed è quindi preferibile a quello triangolare.²⁵ Per discretizzare la superficie in elementi quadrilateri piani è necessario planarizzare (*et_planarize* - *Evolute Tools Pro*) le celle sghembe individuate dalla rete di linee di curvatura

principale (cfr. cap VI, par. 6.2.3). (fig.7.20)

Confrontando le diverse soluzioni sperimentate per discretizzare la superficie è possibile notare che, nonostante la distribuzione dei tasselli segua la rete di curve coniugate, il che assicura una distribuzione caratterizzata da una bassa divergenza tra i pannelli (cfr. 6.4), la superficie è caratterizzata comunque da un aspetto sfaccettato, e genera un pattern di riflessione discontinuo dell'ambiente circostante.²⁶ Tale conseguenza è dimostrata anche dalle variazioni riportate dai grafici elaborati mediante l'analisi delle curve zebra delle diverse soluzioni computate (fig.7.23).

Pertanto, tali soluzioni sono state scartate in quanto non rispettano le intenzioni estetico-progettuali dell'architetto.

Tuttavia, una buona rete di curve può produrre valori di divergenza molto bassi, dell'ordine di millimetri, anche per superfici molto curve. E' noto che una *PQ Mesh* ricavata dalla perturbazione dei vertici della rete di curve coniugate favorisce la possibile trasformazione delle *PQ Strips* in *DStrips*, cioè in strisce sviluppabili.²⁷ Lungo le linee di curvatura principale la torsione è nulla, e l'involuppo dei piani tangenti e delle normali di tali curve generano delle superfici sviluppabili e perpendicolari tra loro.²⁸ (7.21,22d)

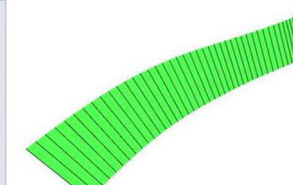
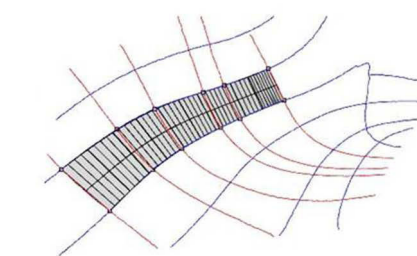
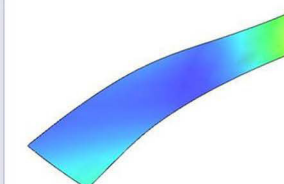
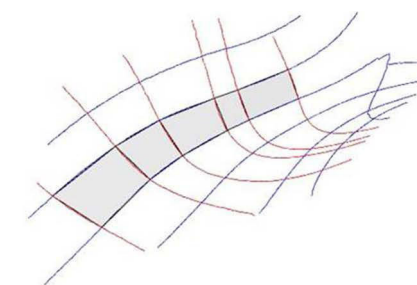
La possibilità di approssimare una superficie complessa mediante la distribuzione di strisce sviluppabili aumenta notevolmente se la forma di base è prevalentemente a curvatura gaussiana negativa o nulla in quanto, tale superficie, segue spontaneamente l'andamento delle superfici rigate. Queste osservazioni avvalorano la tesi che propone l'uso del grafico della curvatura gaussiana come strumento di progettazione.

Come dimostrato (cfr. cap. VI, par. 6.4), le ricerche compiute e divulgate dal gruppo Evolute rappresentano delle linee guida efficaci per generare un modello semi-discreto. Utilizzando il comando *et_subdivide/DStrip* (*Evolute Tools Pro*) è possibile trasformare una *PQ Strip* in una *DStrip* (cfr. cap. VI). (fig.7.22d)

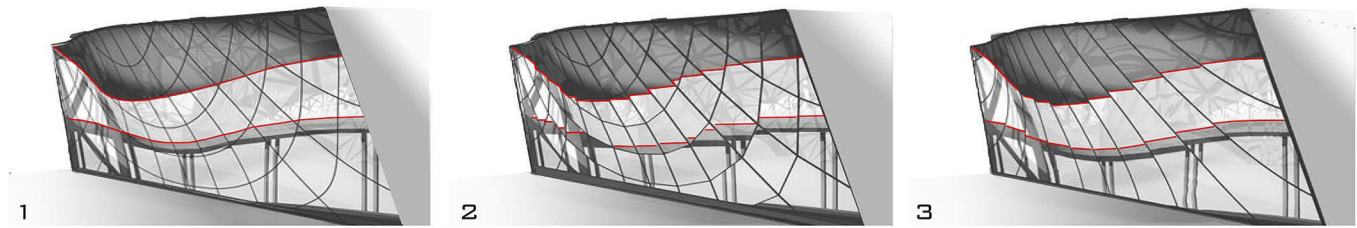
Tuttavia, nonostante la validità teorica e la convenienza economica di tale soluzione, non è attualmente possibile produrre delle strisce di vetro curvo di tali dimensioni.

Pertanto, come anticipato, la superficie è stata discretizzata attraverso la distribuzione di pannelli cilindrici.²⁹

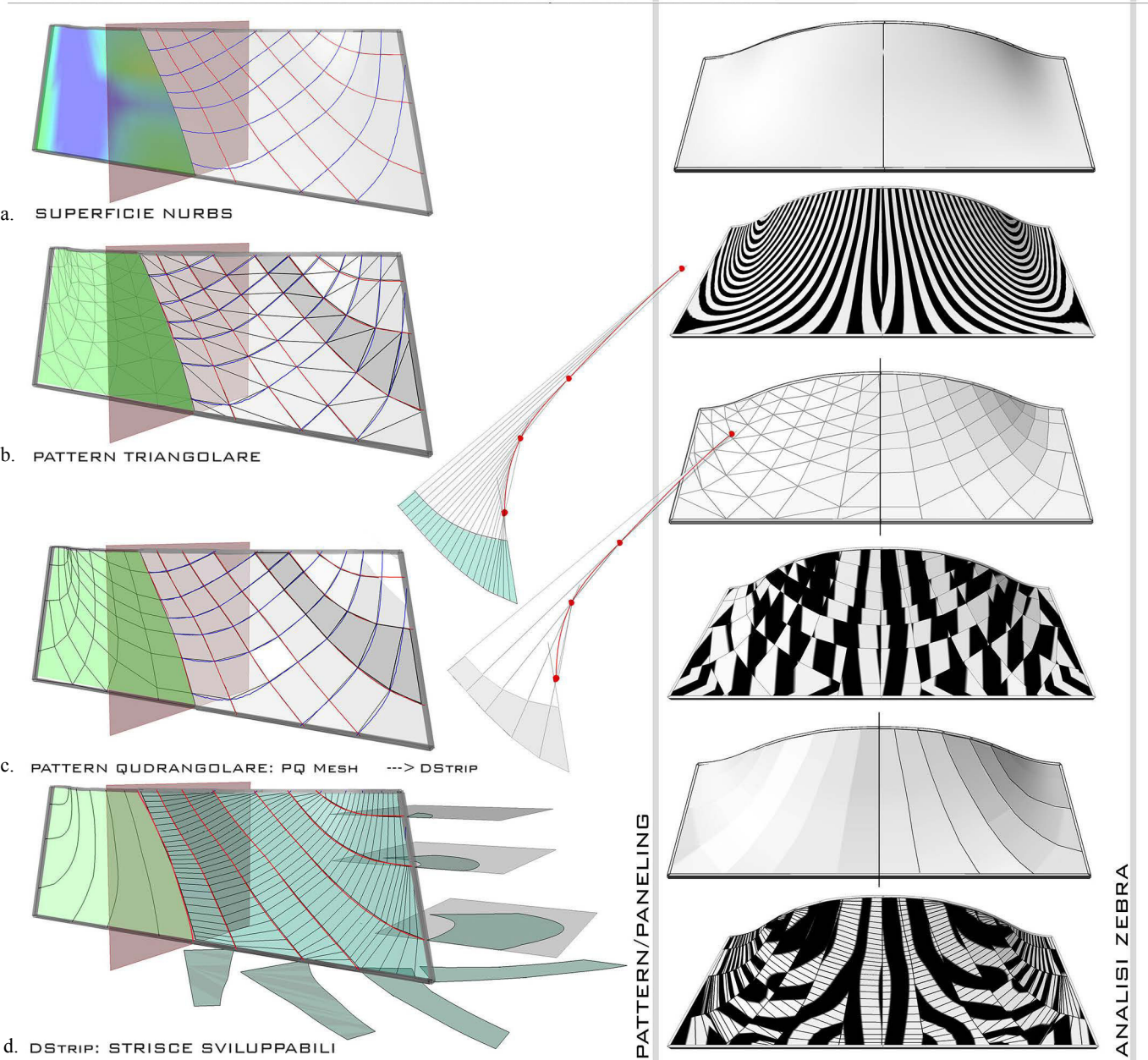
L'assenza del modulo *Panel Fitting* (cfr. cap. VI), necessario per computare la trasformazione delle porzioni di superficie a doppia curva-



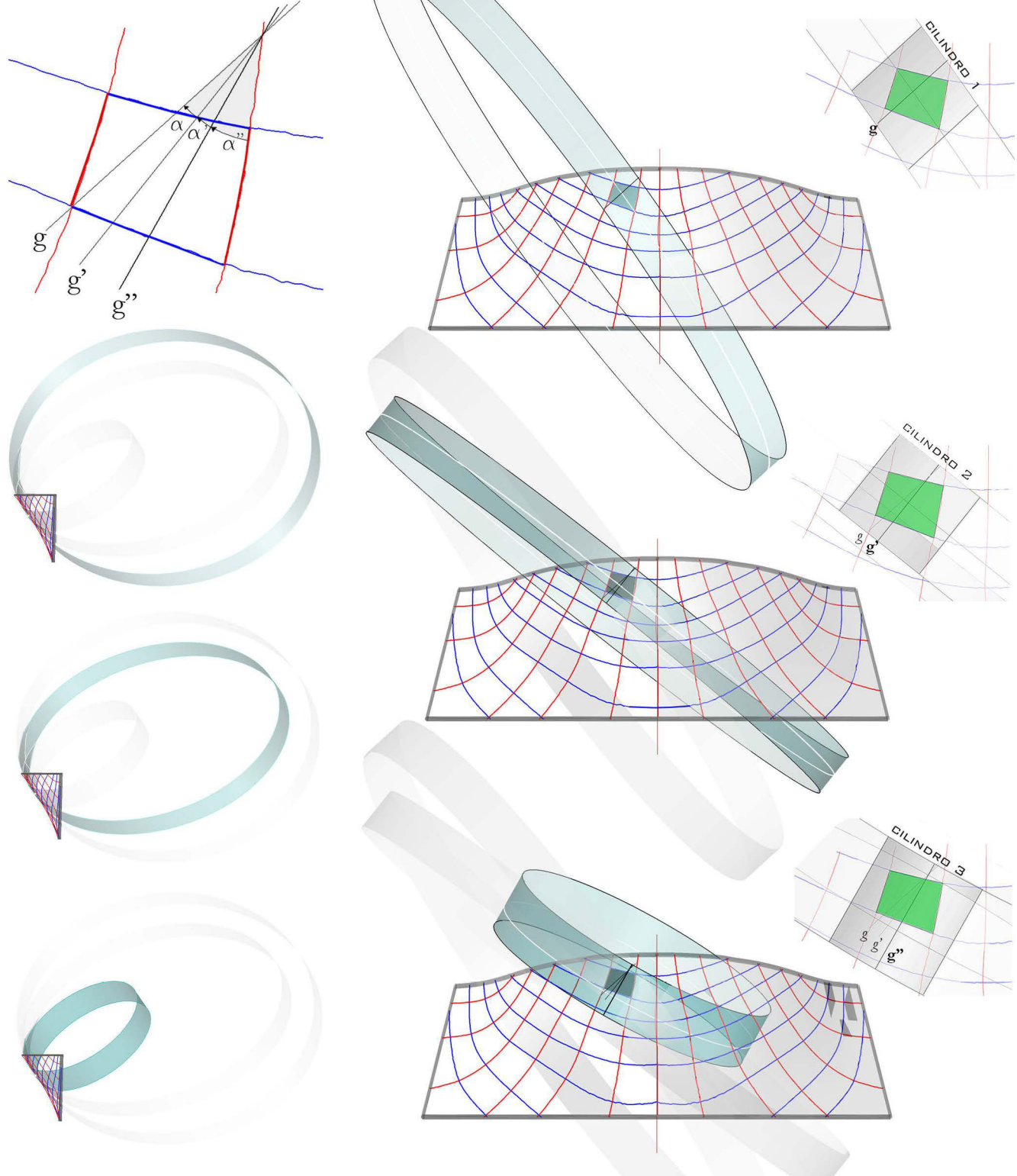
7.21



PATTERN DI RIFLESSIONE: 1.NURBS-2.PQ MESH-3.DSTRIP



Caso studio. Le facciate degli *Eiffel Tower Pavliions*: un sistema portato



tura in porzioni cilindriche mediante l'allineamento delle direzioni asintotiche, ha determinato la necessità di simulare "localmente", e per una sola cella, il processo di distribuzione dei pannelli. Per assecondare l'andamento ascendente della superficie della facciata A tale scopo sono state utilizzate le direzioni delle direttrici e delle generatrici dei cilindri computati dai *geometry experts* e indicate nei grafici esecutivi recuperati. Individuata una cella trapezoidale e sghemba, la cui forma e dimensione è definita dalla rete di linee di curvatura principale, per generare il cilindro retto da cui estrarre il pannello, è stato costruito un cerchio passante per tre punti appartenenti alla rete di curve e prossimi alla posizione della cella, ed è stata ricavata la superficie eseguendo un'estrusione lineare e perpendicolare al piano di giacitura di tale circonferenza.

Procedendo per tentativi, sono stati estratti tre cilindri, approssimativamente tangenti la superficie, le cui generatrici tendono progressivamente a seguire l'andamento ascendente delle linee di massima curvatura (curve rosse), mentre le direttrici seguono le linee di minima curvatura (curve blu) (fig.7.24)

Le linee di curvatura delimitano la forma e le dimensioni del pannello estratto dal cilindro. Utilizzare la stessa procedura per trasformare porzioni di superficie di dimensioni maggiori, semplificando un'intera forma, rappresenta uno spunto di ricerca interessante.

7.5 Panel Fitting: la soluzione finale

Come più volte sottolineato (cfr. cap. VI), la qualità di un sistema discreto, semi-discreto o misto, è condizionata principalmente dalla presenza di lacune, note anche come *divergence*, e dalla variazione degli angoli di inclinazione, o *kink angles*, entrambi esistenti tra pannelli adiacenti. Il modulo *Panel fitting* (*Evolute Tools Pro*), messo a punto dai *geometry experts*, ha consentito di computare la soluzione finale ottimizzando tali parametri nel rispetto dei requisiti richiesti (cfr. cap. VI, par. 6.4).

L'allineamento tra i pannelli è importante per raggiungere una buona qualità estetica della superficie, confermata dal *pattern* delle linee di riflessione che si sviluppa sugli elementi vetrati, e delle buone prestazioni termiche.

Applicando in maniera ricorsiva l'algoritmo ed impostando i valori

di tolleranza ritenuti ottimali è possibile veicolare il grado di qualità desiderato.

Il *Panel fitting* di una superficie può essere eseguito computando il *Local fitting* e il *Global Fitting*³⁰ dei pannelli, che nel caso specifico delle facciate degli *Eiffel Pavilions* sono di forma cilindrica. Pertanto, segue una breve descrizione in cui vengono riportati i risultati sperimentati e pubblicati³¹ da Evolute in collaborazione con RFR.

Il *Local Fitting* dei cilindrici ha determinato degli elevati valori di divergenza, superiori a 2 cm, tra le strisce di pannelli.

Il processo di ottimizzazione procede dunque orientando lo schiaramento dei pannelli in maniera tale che le generatrici dei cilindri seguano l'andamento ascendente della rete di curve (fig.7.25a,b,26). L'algoritmo *Global fitting* consente di ottimizzare l'allineamento dei cilindri generando valori di divergenza molto bassi.

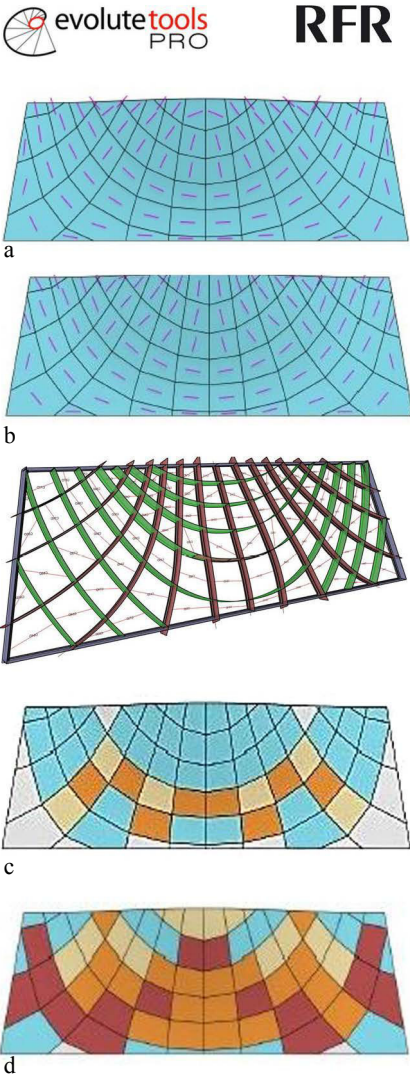
Il massimo valore di *divergence* esistente tra le strisce di pannelli è pari a 17 mm, mentre il valore massimo di *kink angle* è pari a 3,7 gradi.

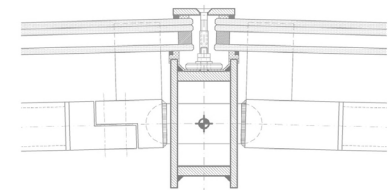
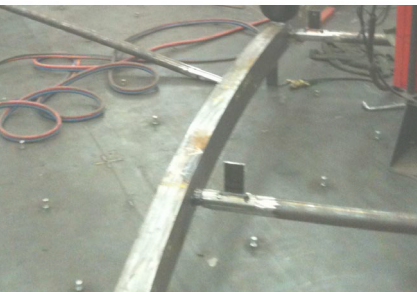
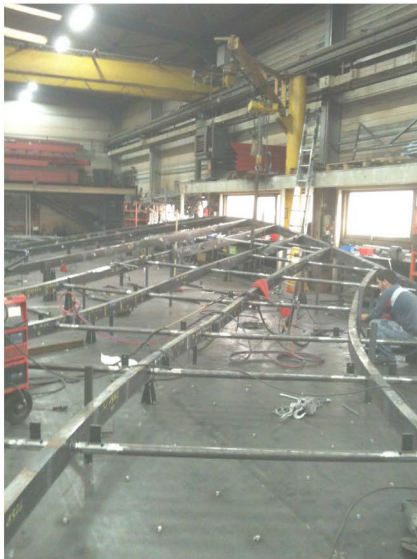
Nonostante la distribuzione ottimizzata dei cilindri lungo la direzione prestabilita, la transizione da una striscia all'altra appare ancora molto evidente: pertanto, non soddisfa le richieste avanzate dall'architetto. La computazione del *Global fitting (with advanced kink angle control)*, ha permesso di raggiungere un valore di *kink angle* di circa 0,4 gradi tra i pannelli distribuiti lungo le strisce, un valore pari a 6 gradi tra le strisce e una *divergence* pari a 3,6 mm tra i pannelli, con una deviazione massima tra il sistema ottenuto e la superficie curva di partenza di circa 12 cm. In conclusione, la soluzione finale adottata per la realizzazione della facciata presenta massimi valori di *kink angle* di circa 0,4 gradi lungo le strisce ed un valore massimo di *divergece* al di sotto di 1,5 millimetri.

Tali valori, unitamente alla geometria semplice degli elementi computati, assicurano il raggiungimento di un'elevata qualità estetica e tecnologica del prodotto finale, ottimizzando le prestazioni e minimizzando i costi necessari per la produzione di ciascun pannello.

Successivamente, i matematici hanno sperimentato la computazione del *Panel Fitting* utilizzando altri tipi di superfici (fig. 7.27c,d).

Oltre ai pannelli piani e cilindrici, che rappresentano le tipologie più semplici ed economiche da produrre, per le facciate è stata computata la distribuzione di porzioni di paraboloidi iperbolici e di tori, capaci di approssimare forme complesse con elevata precisione, migliorando ulteriormente il *pattern* di linee di riflessione della facciata.





7.29,30,31 - Fabbricazione e assemblaggio della sottostruttura.
7.32 - Dettaglio.

Attualmente sono in corso di sperimentazione ulteriori tipi di superfici, tra cui coni, cilindri generici ed elicoidi. Questi sistemi ibridi, composti da pannelli di diversa curvatura, consentono di ottenere valori di *kink angle* e di *divergence* ancora più bassi. Naturalmente, è necessario considerare che maggiore è la curvatura dei pannelli computati e distribuiti, maggiori saranno i costi di produzione necessari per fabbricare ciascuna porzione di superficie. (cfr. cap. VI).

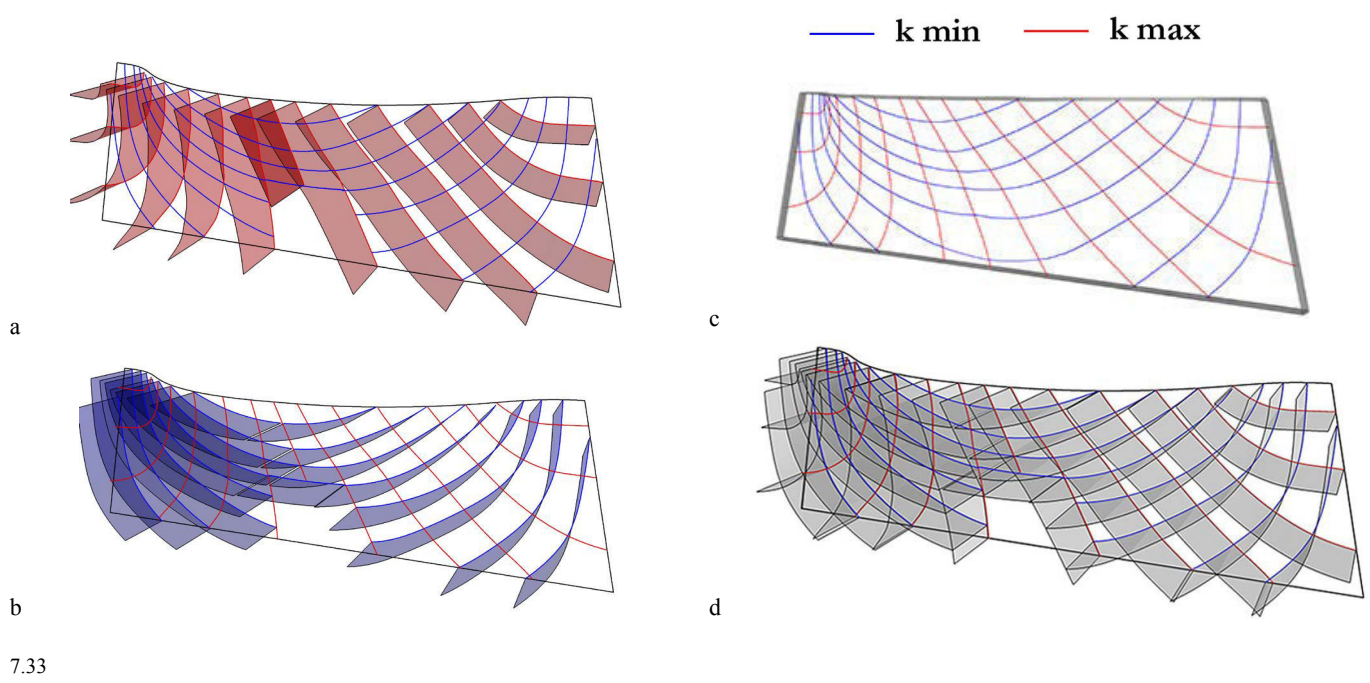
7.6 La sottostruttura

Le facciate degli *Eiffel Pavilions* sono dunque composte pannelli in vetro cilindrici potati da una struttura in acciaio che a sua volta è ancorata ai padiglioni in lamiera rossa ed ancorati al calpestio del primo piano della Torre.

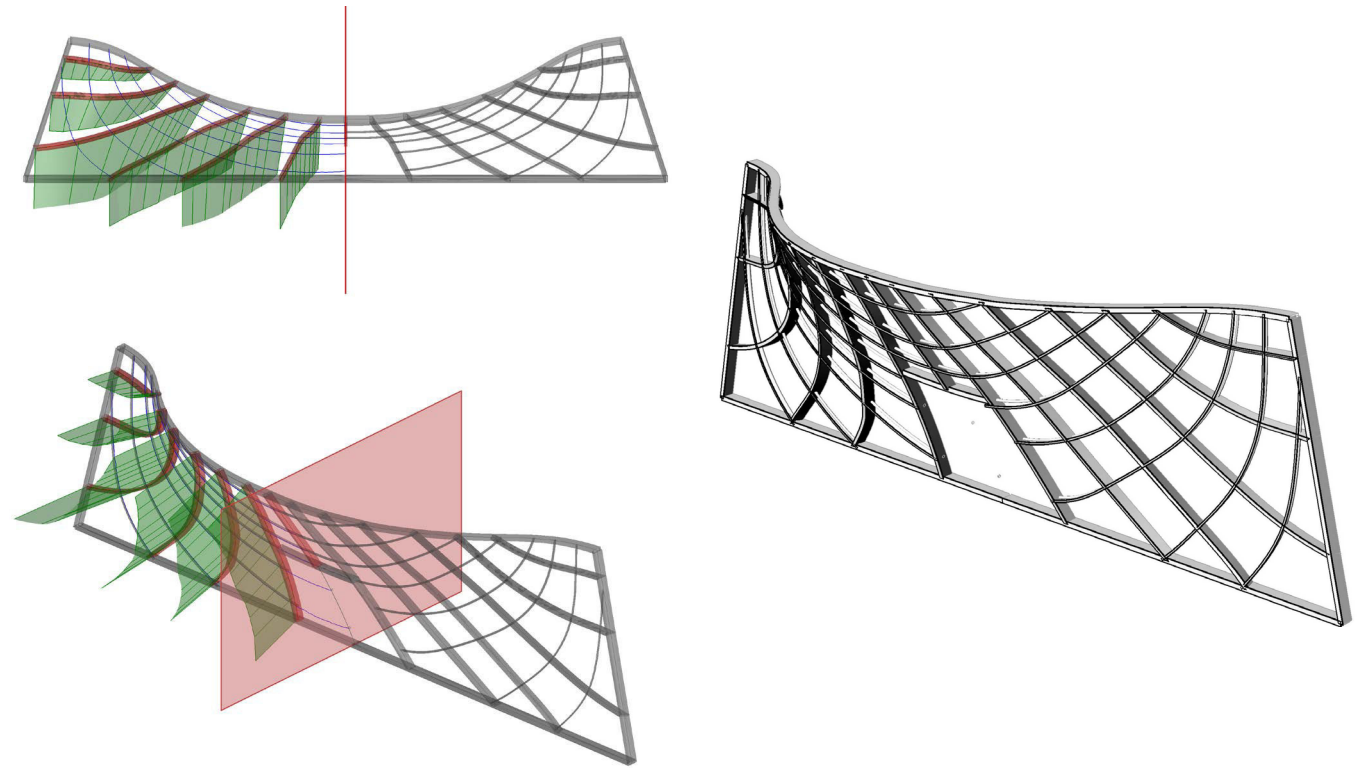
La rete di linee di curvatura estratta dalla superficie è stata ulteriormente utilizzata per modellare le strisce metalliche che, assemblate, compongono i montanti verticali della sottostruttura del sistema.³² Poiché le generatrici dei pannelli cilindrici sono allineate con la direzione di massima curvatura della superficie è preferibile che il *layout* dei montanti verticali ne segua la direzione.³³

Le normali alle linee di curvatura principale generano una superficie sviluppabile.³⁴ Tale proprietà è stata sfruttata per fabbricare le strisce di lamiera che, saldate, compongono le facce curve dei montanti della facciata. Geometricamente, le strisce che compongono le *beam box* (travi scatolari) possono, dunque, essere rappresentate con delle superfici *loft*, le cui curve di sezione successive coincidono con le normali alle linee di curvatura principale. Pertanto, tali strisce sono sviluppabili (fig.7.33). Eseguendo l'*offset* delle strisce ottenute a destra e a sinistra della curva si ottengono le due facce laterali della *beam box*. (fig.7.34)

Per completare il profilo dell'elemento si procede con la costruzione delle facce frontale e posteriore mancanti, le quali saranno anch'esse, di conseguenza, delle superfici sviluppabili, poiché costruite sui bordi delle strisce precedentemente ricavate. Le generatrici delle superfici normali costruite sulle linee di curvatura principale rappresentano, inoltre, le bisettrici degli angoli delle coppie di pannelli cilindrici adiacenti. Grazie a questa proprietà, durante la computazione, l'angolo tra i pannelli viene ottimizzato lungo entrambi i lati



7.33



7.34

7.35

del montante.³⁵

7.7 La fabbricazione e il montaggio

Terminata la fase di computazione geometrica, è possibile passare alla fase di fabbricazione e di montaggio dei pannelli e della sottostruttura. I pannelli di vetro sono stati fabbricati utilizzando delle *glass bending and tempering machines* a controllo digitale,³⁶ capaci di garantire una buona qualità di tempratura del vetro, tolleranze di fabbricazione molto precise e costi ragionevoli. (cfr. cap VI, par. 6.4)

I pannelli sono composti da uno strato esterno di vetro laminato e temperato, necessario per garantire la sicurezza nei confronti dei visitatori, e da uno strato interno di vetro temperato, necessario per garantire alla facciata delle buone prestazioni di carattere termico.³⁷

La lunghezza dei pannelli è definita come la lunghezza massima calcolata lungo la direzione delle generatrici dei cilindri (cfr. cap. IV, par. 4.6). Le strisce di lamiera che compongono i montanti della sottostruttura sono state fabbricate grazie all'uso di macchine a controllo numerico, le *laser cut flat metal sheets*.³⁸ Tali strisce sono state successivamente saldate per chiudere il profilo dei montanti. La facciata, attraverso il sistema di montanti, trasferisce i carichi sui bordi dell'involucro di lamiera rossa. Per ridurre le deviazioni causate dalla forza del vento, i montanti sono stati inoltre fissati alla base dell'involucro, a sua volta ancorato al calpestio del primo piano della Torre.³⁹

I pannelli vengono dunque ancorati agli elementi della sottostruttura. Nelle zone della superficie prevalentemente a curvatura nulla, posta nell'area centrale della parte inferiore della superficie, in fase di computazione, così come in fase di assemblaggio, l'orientamento dei cilindri è meno soggetto a vincoli, e ciò consente una maggiore

libertà di giunzione dei pannelli. Infine, come mostrato nella sezione, è stata realizzata una piastra di chiusura, necessaria per il fissaggio dei pannelli e per la finitura estetica del sistema. (fig.7.35)

Note

¹ “On the practical side, I like the Eiffel Tower Pavilions the most; they are a perfect realisation of ARC’s core results. Explaining some of the geometry is like a lecture in applied differential geometry.” H. Pottmann, in *Optimised building. ARC, International innovation – Disseminating science, research and technology*, 2013, p.2

² *Evolute Tools Lite ed Evolute Tools Pro* – www.evolute.at

³ *A century of history for the 1st floor* - www.eiffel-tower.com/en/redevelopment-of-the-1st-floor/a-century-of-history-for-the-1st-floor.html, p.3

⁴ *SÉANCE PLENIERE DU 8 JUILLET 2011*, Mairie de Paris, *Tour Eiffel – Modification des accès du pilier ouest et des pavillons du premier étage, Vœu relatif à la Tour Eiffel* (7^e arrondissement) - Direction des Affaires culturelles – Département Histoire de l’Architecture et Archéologie de Paris – Commision du vieux Paris, Paris, le 11 juillet 2011, p. 8

⁵ *Ibidem*

⁶ *A century of history for the 1st floor* - www.eiffel-tower.com/en/redevelopment-of-the-1st-floor/a-century-of-history-for-the-1st-floor.html, p. 1

⁷ *SÉANCE PLENIERE DU 8 JUILLET 2011*, Mairie de Paris, *Vœu relatif à la Tour Eiffel*, p.7

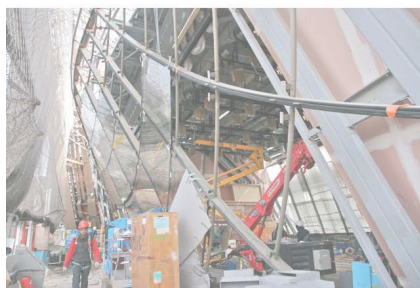
⁸ L’impresa di costruzione BATEG, coinvolta per la ristrutturazione del primo piano della Torre Eiffel è una filiale di *VINCI Construction France*, il principale gruppo di ingegneria civile in Francia, <http://www.bateg.fr/france/bateg/bateg.nsf/web/presentation.htm&lng=>

⁹ *Il nuovo volto della Tour Eiffel in mostra nei giorni della Biennale di Architettura 2012* - blog.atcasa.corriere.it/tendenze/2012/08/09/il-nuovo-volto-della-tour-eiffel-in-mostra-alla-biennale-di-architettura-2012/, p. 2

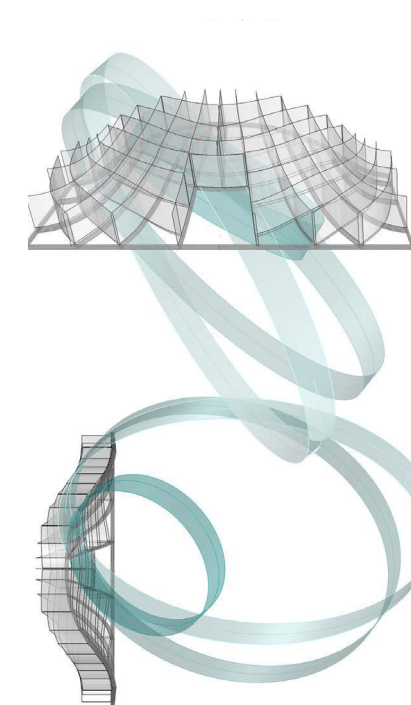
¹⁰ In origine, il colore della Torre Eiffel era rosso

¹¹ *Il nuovo volto della Tour Eiffel in mostra nei giorni della Biennale di Architettura 2012*, p. 2

¹² La Commissione, riunitasi in data 8 luglio 2011, presso l’Hotel de Ville di Parigi, sotto la presidenza di Danièle Pourtaud, Assessore del Patrimonio, ha attentamente valutato ogni particolare del progetto di modifica. Oltre ai tre padiglioni, tra gli interventi sottoposti alla valutazione, è presente anche il pilastro ovest di accesso alle scale che consentono la risalita ai diversi piani della Torre, e quindi l’accesso al primo livello. Nel pilastro ovest, rivolto verso il lato del Champ



7.36 - Fasi di montaggio
7.37 - Particolari della sottostruttura del sistema.



de Mars, è stato nuovamente previsto l'inserimento di un'apposita struttura per il ticketing e per l'accesso al monumento, in Vœu relatif à la Tour Eiffel (7e arrondissement), *SÉANCE PLENIERE DU 8 JUILLET 2011*, Mairie de Paris - Direction des Affaires culturelles – Département Histoire de l'Architecture et Archéologie de Paris – Commision du vieux Paris, Paris, le 11 juillet 2011

¹³ *Creating an entertaining and educational museographic path*, www.eiffel-tower.com/en/redevelopment-of-the-1st-floor/the-new-features-and-what-they-mean.html, p.1

¹⁴ *Ibidem*

¹⁵ *Il nuovo volto della Tour Eiffel in mostra nei giorni della Biennale di Architettura 2012* - blog.atcasa.corriere.it/tendenze/2012/08/09/il-nuovo-volto-della-tour-eiffel-in-mostra-alla-biennale-di-architettura-2012/

¹⁶ *Eiffel tower pavilions redesigned by moatti rivièrè architecture studio* - www.designboom.com/architecture/eiffel-tower-pavilions-redesigned-by-moatti-riviere-architecture-studio/, p. 2

¹⁷ *Ibidem*

¹⁸ Nicolas Leduc, Jacques Raynaud, Niccolo Baldassini, *Project for the Eiffel Tower: Constructive Geometry*, in Bos, Louter, Nijse, Challenging Glass 3 - Conference on Architectural and structural applications of glass, IOS Press, 2012, p. 94

¹⁹ Henry Rivière (1965-2010)

²⁰ moatti – rivièrè, architecture et scénographie - <http://moatti-riviere.com>

²¹ A. Shiftner, N. Leduc, P. Bompas, N. Baldassini, M. Eigensatz, *Architectural Geometry from Research to Practice: The Eiffel Tower Pavilions*, in Hesselgren, Sharma, Wallner, Baldassini, Bompas, Raynaud, *Advances in Architectural Geometry* 2012, p. 222

²² *Ibidem*, p. 221

²³ *Ibidem*

²⁴ *Ibidem*, p. 223

²⁵ cfr. cap. VI

²⁶ M. Eigensatz, A. Schiftner, *Paneling the Eiffel Tower Pavilions*, in *Case Studies in Optimization of Glass-panelized Architectural Freeform Designs for the Eiffel Tower Pavilions*, Glass Performance Days Proceedings, (2011), www.glassonweb.com/articles/article/765/, p. 5

²⁷ cfr. cap. VI

²⁸ cfr. cap. V

²⁹ M. Eigensatz, A. Schiftner, *Paneling the Eiffel Tower Pavilions*, in Op. cit., p. 5

³⁰ *Ibidem*, p. 6

³¹ M. Eigensatz, A. Schiftner, *Paneling the Eiffel Tower Pavilions*, in *Case Studies in Optimization of Glass-panelized Architectural Freeform Designs for the Eiffel*

Tower Pavilions

³² Nicolas Leduc, Jacques Raynaud, Niccolo Baldassini, *Project for the Eiffel Tower: Constructive Geometry*, in Bas, Louter, Nijse, Challenging Glass 3 - Conference on Architectural and structural applications of glass, IOS Press, 2012, p. 96

³³ *Ibidem*, p. 95

³⁴ *Ibidem*, p. 99

³⁵ *Ibidem*

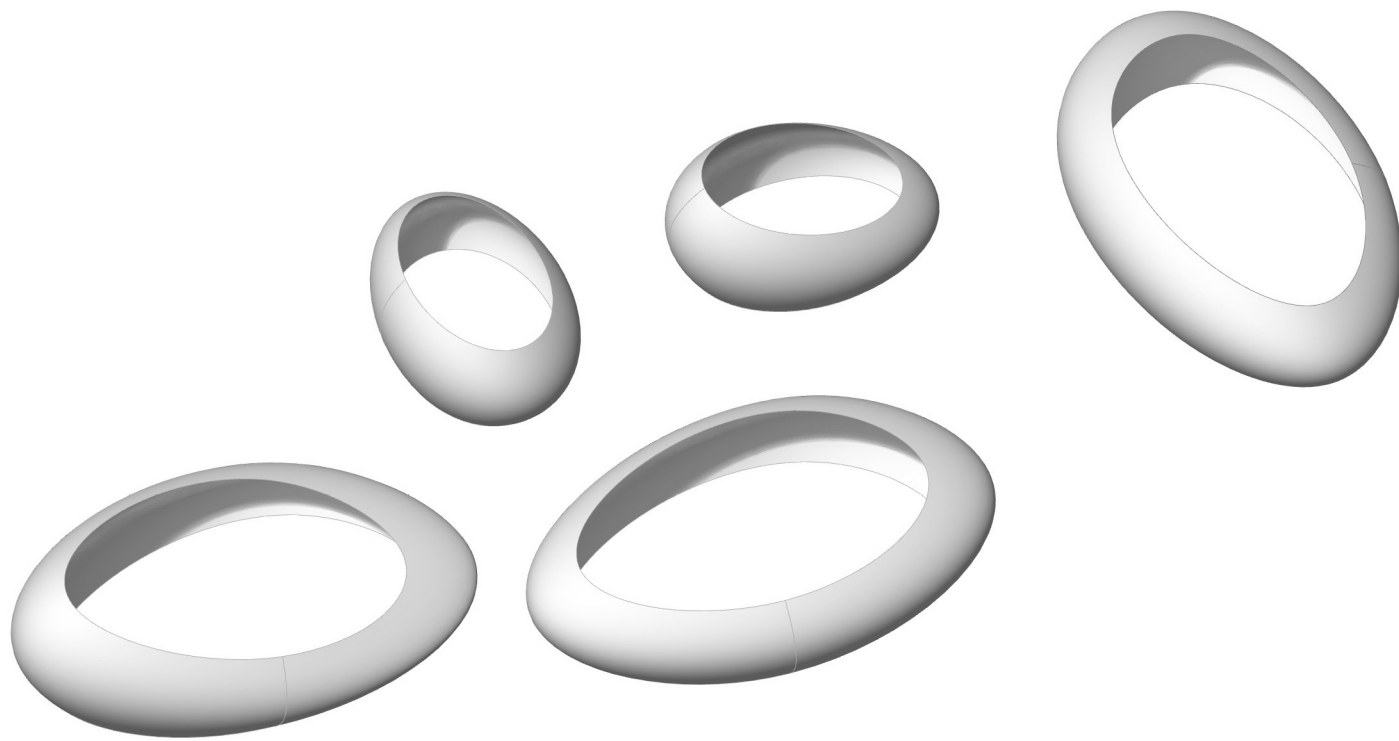
³⁶ *Ibidem*, (p. 98

³⁷ *Ibidem*, p. 97

³⁸ A. Shiftner, N. Leduc, P. Bompas, N. Baldassini, M. Eigensatz, *Architectural Geometry from Research to Practice: The Eiffel Tower Pavilions*, in Hesselgren, Sharma, Wallner, Baldassini, Bompas, Raynaud, *Advances in Architectural Geometry* 2012, p. 224

³⁹ *Ibidem*

Caso applicativo.
I Cocoon Pavilions: un sistema autoportante



8.1 I Cocoon Pavilions: introduzione

Il tema della discretizzazione di superfici complesse è stato affrontato con l'obiettivo di individuare, di apprendere e di sistematizzare quei processi in grado di favorire la definizione di possibili approcci e soluzioni ottimizzate. In coerenza con tale linea di ricerca è stato di fondamentale importanza connettere la trattazione teorica con l'esperienza reale, tra teoria e prassi.

Lo scopo è quello di dimostrare le finalità pratiche dell'attività di ricerca e di sistematizzazione affrontate all'interno dei capitoli precedenti.

Tale esperienza ha, inoltre, dimostrato l'importanza di avviare delle attività di collaborazione tra il modo accademico, i centri di ricerca specializzati e le aziende.

Oggetto della sperimentazione sono state le due versioni di un padiglione, un sistema discreto autoportante, fisicamente realizzate discretizzando una superficie-involucro in elementi esagonali piani: il *Cocoon Temporary Pavilion* e il *Cocoon Evo Pavilion*.

La costruzione del *Cocoon Temporary Pavilion* è avvenuta partecipando e collaborando all'interno di un workshop promosso dal centro di ricerche *Medaarch* (*Accademia Mediterranea d'Architettura*) – *Mediterranean FabLab*¹ e dal centro di ricerche *Co-de-iT* (*Computational Design Italy*)²: tale partecipazione ha rappresentato un'esperienza di ricerca e



di sperimentazione concreta, che ha consentito di affrontare le problematiche connesse alle fasi di modellazione e discretizzazione della forma, ma soprattutto a quelle relative alla fabbricazione e alla costruzione fisica del padiglione. Alla luce dei principi teorici indagati, è interessante mostrare i risultati concreti che ne derivano.

Tale esperienza è stata di fondamentale importanza in quanto ha rappresentato, al tempo stesso, lo stimolo e l'esito dell'intero percorso di ricerca. La *Medaarch*, Accademia Mediterranea di Architettura la cui sede è a Cava de' Tirreni, in provincia di Salerno, è un centro di formazione e ricerca d'avanguardia, dedicata allo sviluppo di ricerche mirate a fornire nuove visioni e risposte alle sfide del nostro tempo.³ L'Accademia si avvale del *Mediterranean FabLab*, laboratorio di produzione digitale dotato di stampanti 3D, fresatrici, e sistemi elettronici, organizzando corsi *entry level* e *advanced*, workshop sull'architettura e *summer school*. L'accademia favorisce il dialogo tra le imprese ed il mondo della ricerca, garantendo l'implementazione di soluzioni dall'elevato contenuto tecnologico e dall'elevato grado di industriabilità. Aiuta a riprogettare la cultura aziendale e a rafforzare il *know how* delle figure coinvolte in maniera flessibile e innovativa favorendo l'integrazione tra saperi diversi secondo una logica multi-culturale e multidisciplinare.

Il centro di ricerche Co-de-iT è strutturato come una rete di 'cluster' eterogenei accomunati dall'interesse inerente l'impatto della computazione come strumento di design nelle discipline creative; sviluppato a cavallo di discipline come la biologia e la tecnologia permette la coalescenza dei membri interessati e dei collaboratori esterni in team multidisciplinari, allo scopo di affrontare diverse esplorazioni che uniscono la ricerca, la sperimentazione, l'educazione e le attività di networking in un unico flusso di lavoro.⁴

Grazie alla presenza del *Mediterranean FabLab*, primo laboratorio di fabbricazione digitale del sud Italia,⁵ la *Medaarch* svolge numerose attività di carattere didattico ed accademico, sviluppate con l'intenzione di indagare e di sperimentare i contenuti ed i processi che legano la fase di progettazione e di speculazione teorica, proprie del *computational design*, alle tecniche di *Digital Fabrication*.

All'interno di questa accademia, l'applicazione di tali tecniche viene sperimentata su vari materiali, come carta, cartone, alluminio, polipropilene e plastica, uniti allo sviluppo di tecniche di incollaggio, assemblaggio e incastro. Inoltre, il laboratorio rappresenta uno spazio

di *co-working* e *co-fabbing*, dove è possibile condividere conoscenza, saperi e possibilità di crescita.

L'obiettivo, spiega Amleto Picerno Ceraso, CEO e docente presso *Medaarch*, è "*indagare i processi che portano dalla progettazione di design e manufatti architettonici, fino alla loro realizzazione fisica.*"⁶ Rafforzare o ispirare la collaborazione tra le Università e tali centri consente di coniugare il mondo della ricerca e del rigore scientifico con la possibilità di sperimentare esperienze concrete, applicando le competenze sviluppate individualmente e in ambiente accademico, attraverso la collaborazione con le figure coinvolte all'interno di queste realtà.

A tale scopo, il seguente paragrafo presenta e discute in maniera dettagliata, le modalità di realizzazione del primo padiglione, il *Cocoon Temporary Pavilion*, evidenziandone le criticità, di carattere formale, statico, costruttivo e legate alle caratteristiche del materiale impiegato, che hanno condotto i due centri di ricerca coinvolti all'elaborazione di una seconda versione, il *Cocoon Evo Pavilion*, evoluzione del precedente prototipo.

Il secondo padiglione ha consentito nuove esplorazioni morfologiche e sperimentazioni di carattere statico e rappresenta il prodotto finito dell'intero processo.

Il *Cocoon Evo Pavilion* è stato esposto all'ingresso della *Maker Faire*, tenutasi a Roma nel mese di ottobre 2013, nel piazzale Kennedy sito di fronte al Palazzo Eur dei Congressi.⁷ (fig.)

8.2 Il *Cocoon Temporary Pavilion*: il prototipo

Il *Cocoon Temporary Pavilion* è il risultato del workshop *gh_to Fabrication* tenutosi, dal 13 al 16 maggio 2013, presso il *Mediterranean Fab Lab* di Cava De Tirreni. Attraverso il controllo delle modalità progettuali di tipo computazionale è stato possibile giungere alla definizione parametrica ed alla fabbricazione e costruzione di un padiglione di media scala discretizzato in esagoni. Il padiglione ha una struttura ad anello realizzata congiungendo insieme 231 pannelli esagonali piani in cartone ondulato che, come in un mosaico tridimensionale, realizzano un "bozzolo" largo circa sette metri e alto poco più di tre metri.⁸

I tutor, l'architetto Amleto Picerno Ceraso⁹ e l'architetto Andrea Graziano¹⁰ hanno guidato il *team*, composto dai membri del *Fab Lab* e da un gruppo eterogeneo di architetti ed ingegneri, tra cui l'auto-

re di questa tesi,¹¹ attraverso le fasi di *computational design* e di *Digital Fabrication* della struttura. Dall'analisi del campione di casi è emerso che la realizzazione di forme curve mediante tassellazione in esagoni piani vanta un numero molto limitato di sperimentazioni finalizzate ad un risultato concreto. Confrontando il caso studio con gli altri esempi esistenti, il seguente approccio è stato sviluppato mirando alla realizzazione di un sistema non solo discreto, ma anche autoportante, aspetto stimolante soprattutto nell'ottica dell'ottimizzazione dei costi di produzione e dei tempi di fabbricazione e montaggio. Tuttavia, tale risultato è stato raggiunto attraverso l'evoluzione del primo prototipo. L'intero processo è stato suddiviso in quattro fasi: ricerca formale, discretizzazione/planarizzazione, *gravity test* (verifica statica/cinematica) e fabbricazione/montaggio.

8.2.1 La ricerca della forma

Per definire le dimensioni del padiglione, si è tenuto conto della disponibilità spaziale e della metratura di un ambiente esistente, il piano terra della Mediateca MARTE (*Mediateca Arte Eventi*) di Cava de' Tirreni, solitamente impiegata come sala di lettura e per l'organizzazione di eventi e di performance musicali. La necessità di individuare una location specifica rientra, a tutti gli effetti, nella fase di computazione dell'intera struttura (fig.8.2): le dimensioni dell'oggetto non rappresentano, infatti, un dato da sottovalutare, in quanto esse incidono sul numero di elementi necessari per discretizzare l'intera superficie, coinvolgendo di conseguenza le dimensioni di ciascuno dei pannelli. Inoltre, il numero complessivo e le dimensioni degli elementi influiscono notevolmente sul grado di approssimazione della forma di origine, sulla ricerca dell'equilibrio dei vertici in fase di planarizzazione, sul comportamento statico dell'intero manufatto, sui tempi di taglio, di assemblaggio e sul numero e sulla tipologia degli elementi di connessione e quindi, in conclusione, sui costi complessivi di fabbricazione e montaggio.

La ricerca dell'equilibrio statico ha rappresentato uno degli obiettivi principali dell'intero processo: la reale sfida consisteva proprio nel creare un oggetto di media scala discretizzato in elementi esagonali regolari, ma soprattutto autoportante. Come si evince dal campione analizzato, sono stati presentati dei casi in cui il pattern esagonale è

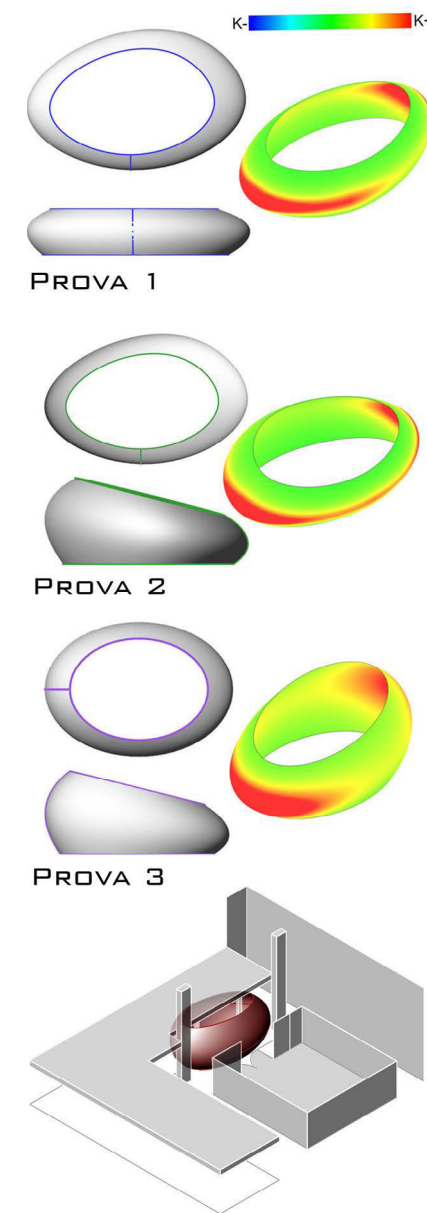
il meno diffuso tra le soluzioni ad oggi realizzate e le superfici sono caratterizzate dall'alternarsi di elementi esagonali concavi e convessi (cr. Cap. IV, schede 2a, 2b).

Si ricorda che tale condizione dipende strettamente, come dimostrato (cfr. cap VI), dal segno della curvatura gaussiana della superficie discretizzata. Pertanto, la fase di definizione formale della superficie dell'involucro è stata affrontata puntando sulla ricerca delle condizioni morfologiche idonee per consentire la planarizzazione delle porzioni di superficie in esagoni convessi. Questo invita ad interrogarsi su quanto la necessità di giungere consapevolmente alla definizione di prodotti fattibili condizioni la libertà delle scelte morfologico - progettuali.

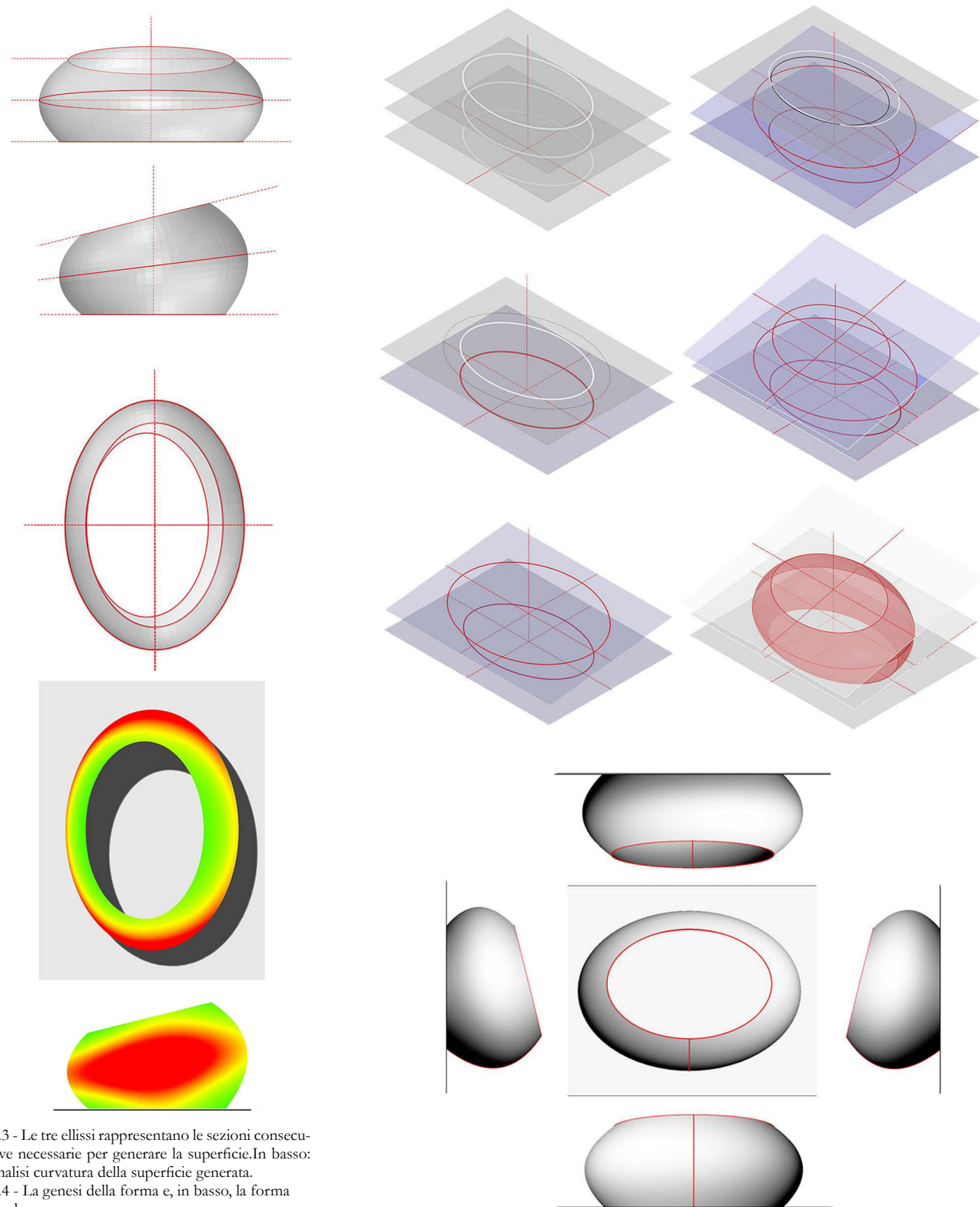
Pertanto, è stato necessario effettuare una serie di prove per generare una forma che fosse idonea al raggiungimento dello scopo.

La superficie è stata modellata attraverso l'uso del software *Rhinoce-rs*. Per generare una superficie a curvatura prevalentemente positiva sono state posizionate nello spazio una serie di ellissi.

La qualità di tutte le soluzioni è stata puntualmente verificata attraverso la diagnosi della curvatura gaussiana di ciascuna delle superfici generate (fig.8.1). Per generare la superficie definitiva, la prima operazione è stata quella di disegnare un'ellisse piana, appartenente al piano x-y, di 700 cm x 500 cm, la quale rappresenta la curva di base su cui appoggia l'intera struttura. E' stata poi disegnata un'altra ellisse di dimensioni maggiori, cm 840 cm x 600 cm, posta ad una quota di circa 150 cm e inclinata di 7 gradi rispetto al piano x-y. Infine, la struttura è stata completata disegnando una terza ellisse, di dimensioni 630 cm x 450 cm, appartenente ad un piano inclinato di 14 gradi, rispetto al piano x-y e posta ad una quota pari a 300 cm, misurata rispetto al centro dell'ellisse di base. Le tre ellissi rappresentano le sezioni consecutive necessarie per la generazione della superficie loft. (fig.8.3,8.4) La soluzione finale (fig.8.4) è dunque rappresentata da un anello le cui dimensioni sono 717 cm x 513 cm x 310 cm. A tale proposito, è interessante ed utile, ai fini compositivi, evidenziare la somiglianza della forma ottenuta con alcune superfici analitiche, tra cui il toro e le cicliidi.¹² L'uso di superfici che derivano da una genesi formale ben definita induce a riflettere sulla possibilità di utilizzare e di fondere geometrie note per simulare o ricavare, in maniera consapevole, delle forme complesse, allo scopo di veicolarne la discretizzazione e la conseguente realizzazione.



8.1 - La ricerca della forma attraverso l'analisi della curvatura gaussiana
8.2 - Il modello mostra le prove di inserimento del padiglione all'interno della location.



8.3 - Le tre ellissi rappresentano le sezioni consecutive necessarie per generare la superficie. In basso: analisi curvatura della superficie generata.

8.4 - La genesi della forma e, in basso, la forma finale.

8.2.2 La Discretizzazione: *hexagonal paneling*

Una volta ricavata la forma idonea al raggiungimento dello scopo è possibile passare alla fase di discretizzazione della superficie in elementi esagonali piani. Per discretizzare la forma modellata è stato utilizzato il *digital tool Lunch Box (Grasshopper)*, ed in particolare il pattern *Honeycomb*, scelto le tipologie disponibili (cfr. cap VI, par. 6.2.2). Attraverso questo strumento, il numero di celle distribuite dipende dal valore attribuito ai parametri *u* e *v*, a cui corrisponde il numero di curve iso-parametriche che suddividono il dominio di definizione della superficie NURBS.

Il valore assegnato ai due parametri, 52 *u* x 8 *v*, indica il numero di curve necessarie per gestire la distribuzione degli esagoni sulla superficie.

Il numero totale di celle esagonali distribuite è pari a 231.

Si ricorda che la scelta dei valori da attribuire ai parametri *u* e *v* influisce quantità, sulla qualità e sulla dimensione dei pannelli.

E' importante ricordare (cfr. cap VI, par. 6.2) che, in questa fase, le celle esagonali distribuite sulla superficie sono regolari in quanto sghembe, e cioè i bordi perimetrali di ciascun elemento non sono complanari: questa osservazione è utile per dimostrare che la distribuzione di un pattern, in quanto tale, non è casuale, ma è legata alla natura del supporto su cui esso si manifesta.

Per planarizzare gli elementi è stato utilizzato il *plug-in open-source, Kangaroo Physics*,¹³ di *Grasshopper*. (fig.8.6)

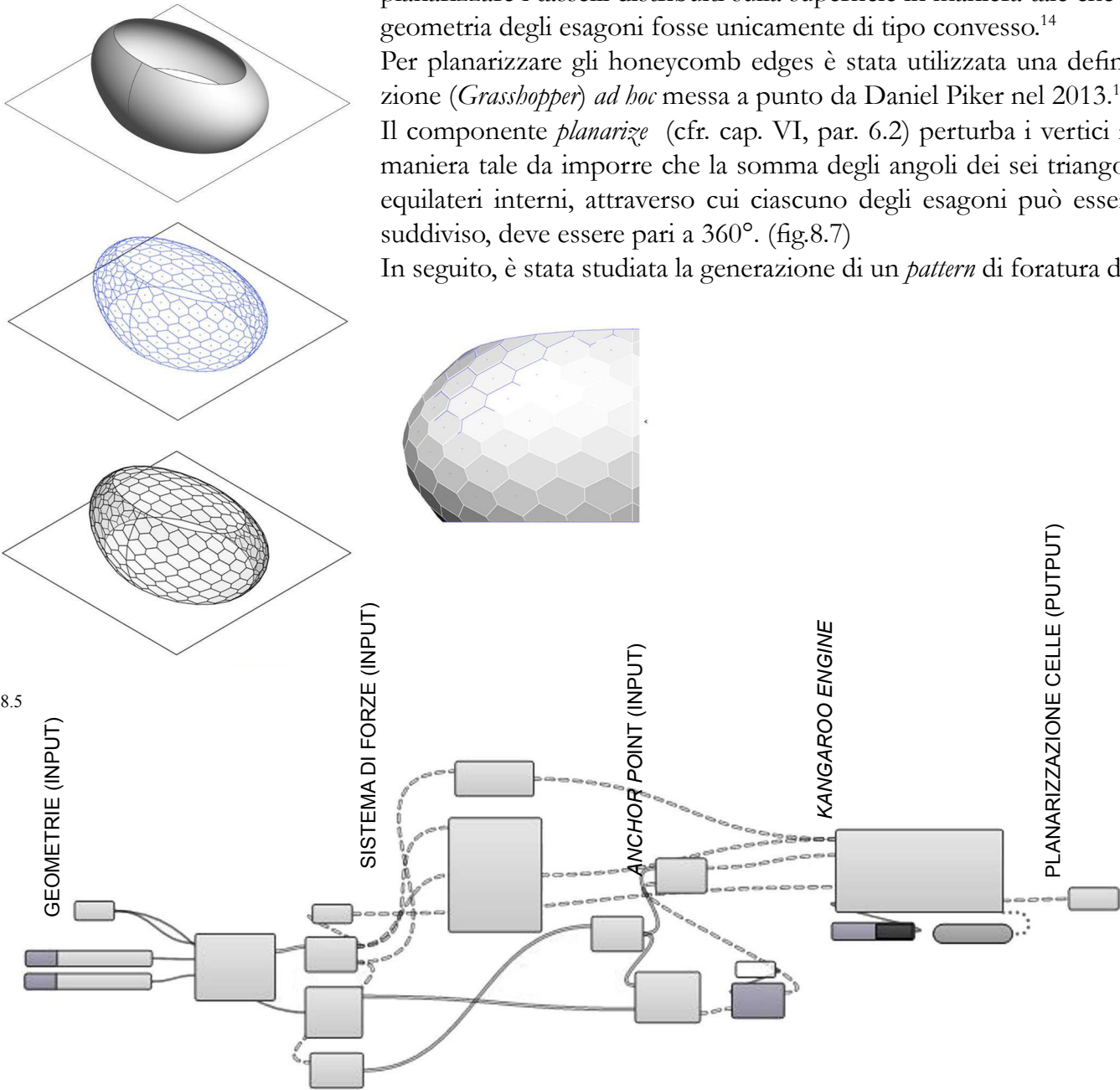
Il componente/forza *planarize* computa la complanarità dei bordi delle celle poligonali, nel caso specifico gli *honeycomb edges* distribuiti sulla superficie. Tale condizione di planarità è necessaria per procedere alla successiva fase di taglio degli elementi.

Come dimostrato, molti aspetti influenzano il calcolo del processo di planarizzazione, che non sempre riesce a convergere ad una soluzione: primo tra tutti, la curvatura della superficie, a cui seguono gli elementi di ancoraggio, le tolleranze, il numero e le dimensioni delle celle esagonali.

I principali vincoli imposti per il calcolo della planarizzazione sono rappresentati dal tipo di curvatura della superficie e dalla scelta dei punti di ancoraggio, elementi appartenenti alla superficie di origine rispetto ai quali la nuova struttura discreta non deve allontanarsi.

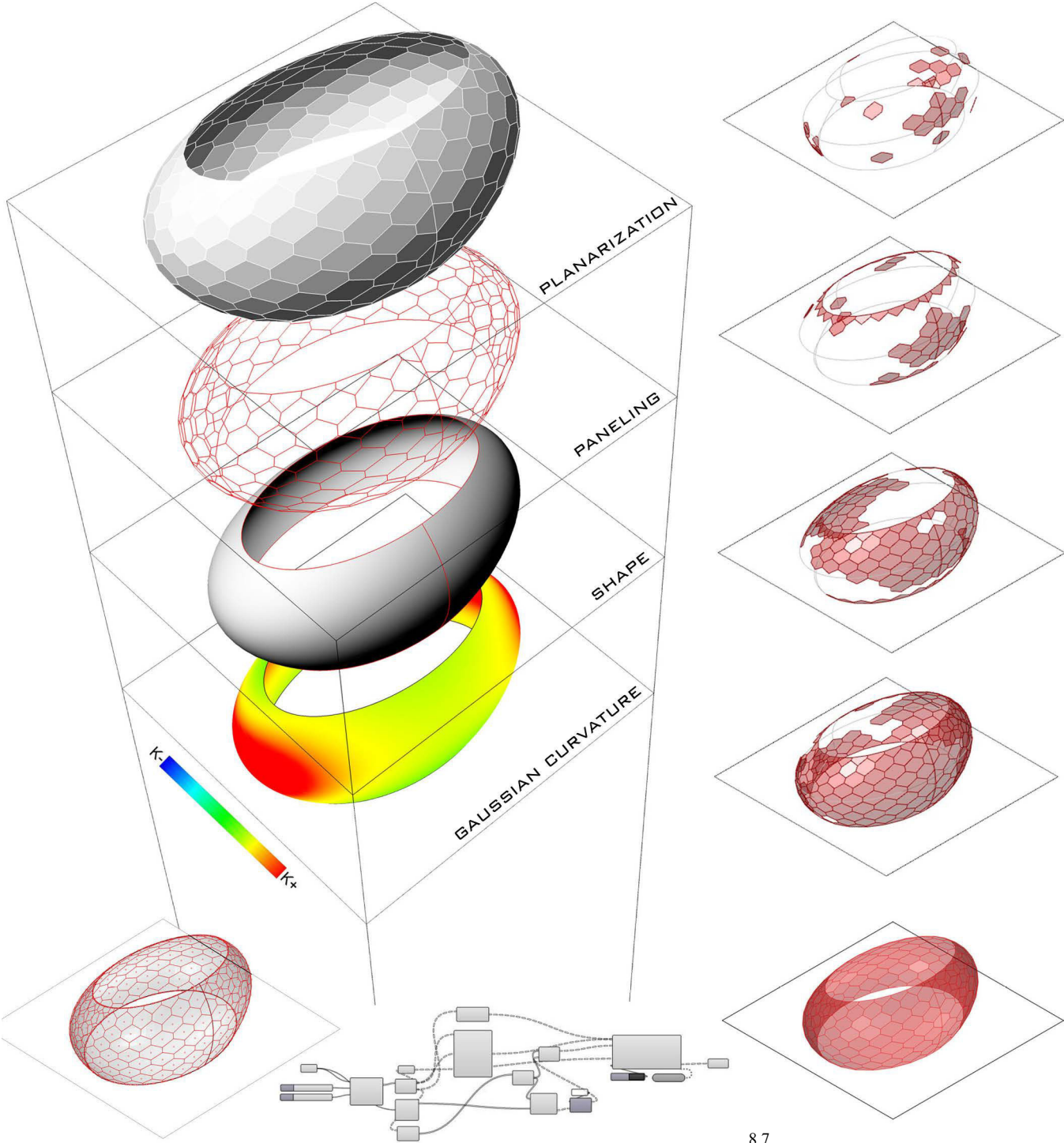
L'individuazione dei punti di ancoraggio è fondamentale poiché

consente di conservare il più possibile la forma durante la fase di planarizzazione, assicurando lo scarico a terra delle forze lungo i bordi della struttura. Fondendo le capacità del componente *planarize* con la conoscenza delle condizioni e dei principi geometrici e matematici indagati all'interno dei capitoli precedenti, è stato possibile planarizzare i tasselli distribuiti sulla superficie in maniera tale che la geometria degli esagoni fosse unicamente di tipo convesso.¹⁴ Per planarizzare gli honeycomb edges è stata utilizzata una definizione (*Grasshopper*) *ad hoc* messa a punto da Daniel Piker nel 2013.¹⁵ Il componente *planarize* (cfr. cap. VI, par. 6.2) perturba i vertici in maniera tale da imporre che la somma degli angoli dei sei triangoli equilateri interni, attraverso cui ciascuno degli esagoni può essere suddiviso, deve essere pari a 360° . (fig.8.7) In seguito, è stata studiata la generazione di un *pattern* di foratura dei

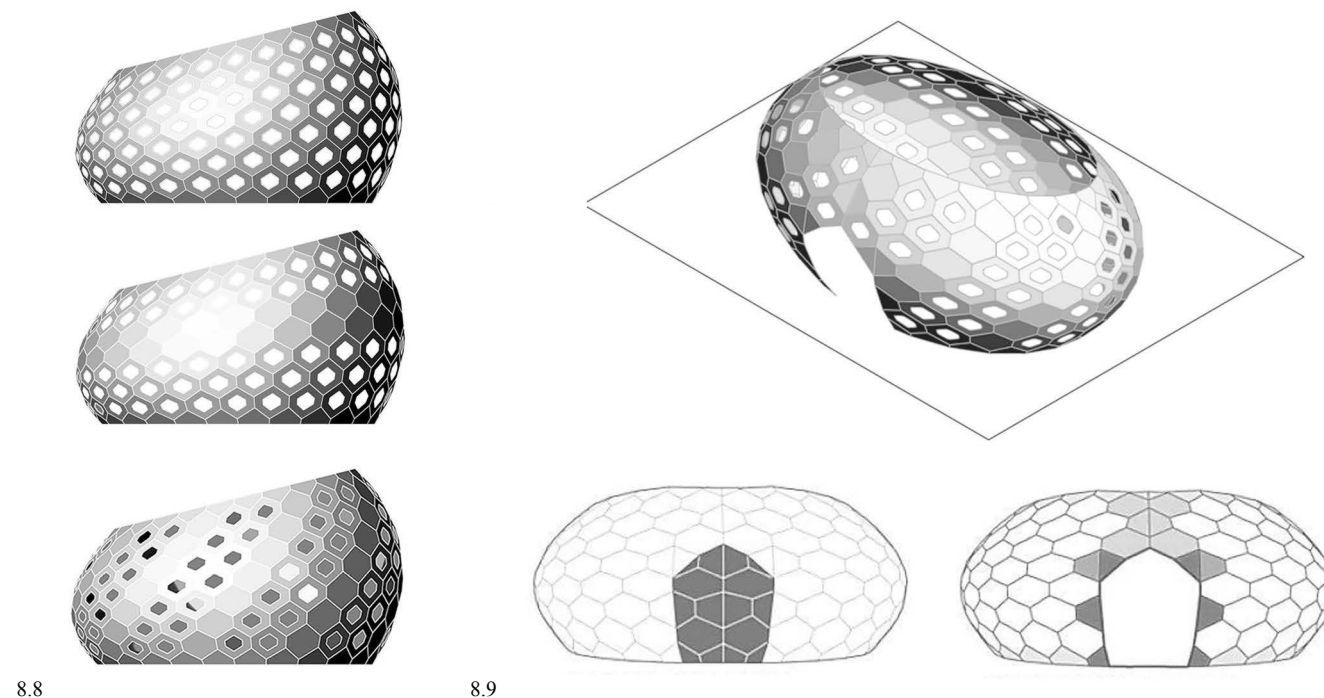


8.5

8.6

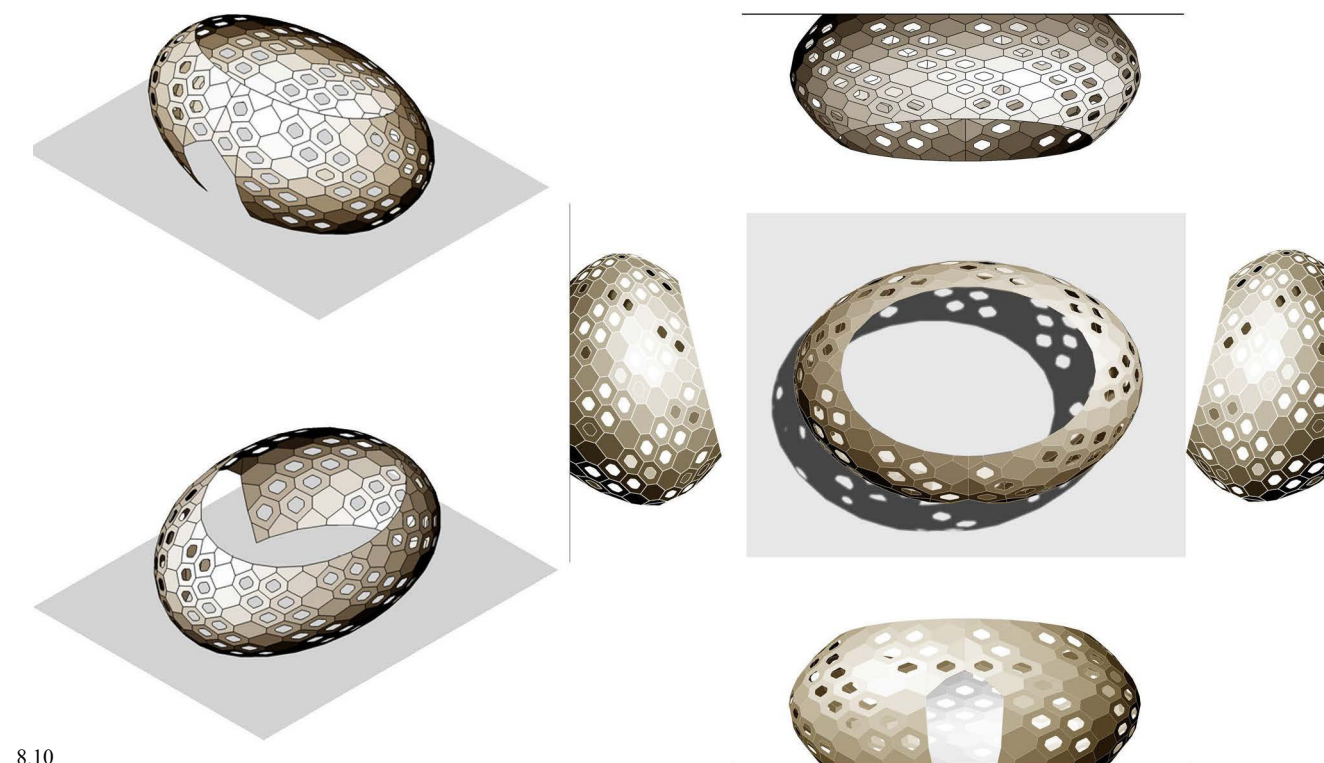


8.7



8.8

8.9



8.10

pannelli da applicare all'intero anello (fig.), allo scopo di alleggerire la struttura. Tale *pattern* gestisce la distribuzione di pannelli pieni e forati sulla superficie. Grazie alla foratura di alcuni pannelli, è stato inoltre possibile creare una permeabilità tra lo spazio interno e l'ambiente esterno al padiglione. Tale *pattern* è stato scelto tra una serie di soluzioni possibili¹⁶ generate operando su codici capaci di reiterare sequenze di informazioni che lasciano emergere, di volta in volta, differenti soluzioni distributive (fig.8.8). Infine, sono stati tagliati ed eliminati alcuni esagoni in corrispondenza della porzione di superficie in cui si è ritenuto necessario aprire un varco di passaggio (fig.8.9): questa operazione, a posteriori rispetto alla fase di genesi formale, ha comportato alcune problematiche di carattere statico.

8.2.3 Il *Gravity test*: un sistema instabile

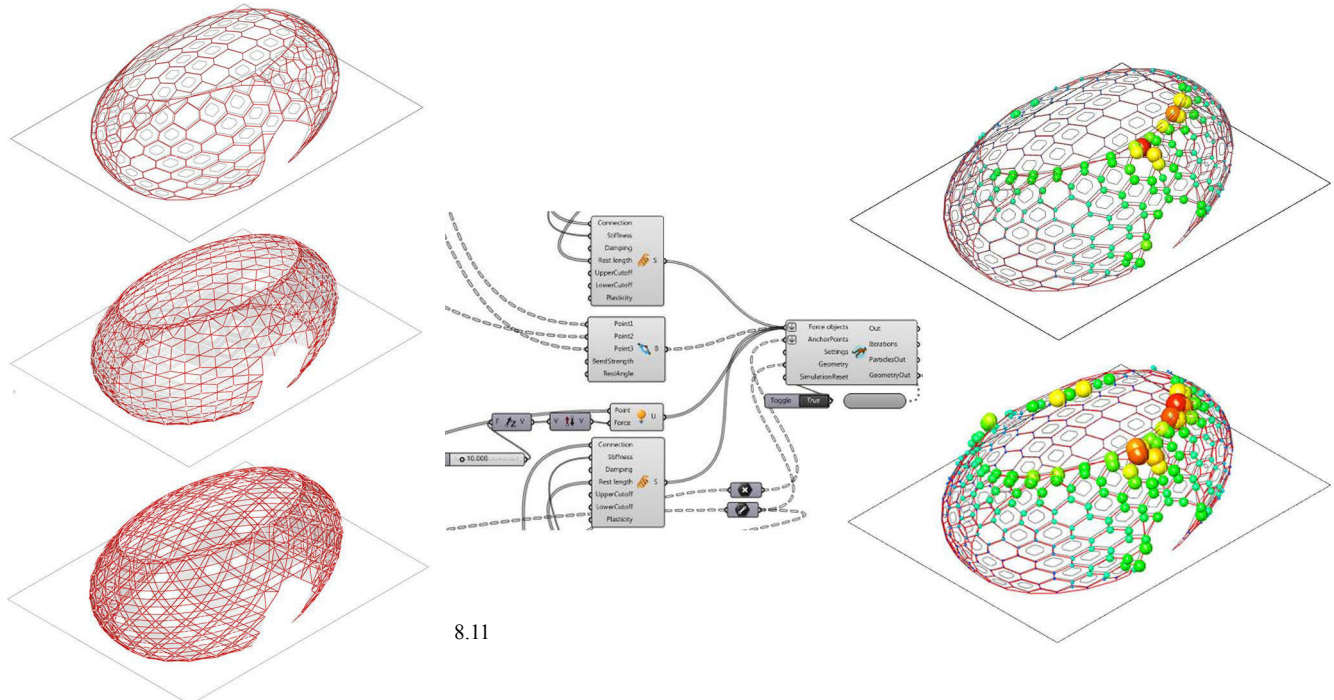
Il *Gravity test*, effettuato sempre grazie al *plug-in Kangaroo*, ha rilevato i punti critici dell'intera maglia strutturale, evidenziandone la maggiore distribuzione in corrispondenza del portale d'ingresso.

Questo test consiste in una verifica di carattere cinematico dell'intero sistema. Le geometrie in input sono i vertici ed i bordi degli esagoni piani, mentre gli *anchor point* coincidono con i punti distribuiti lungo l'ellisse superiore ed inferiore dell'anello. Il componente/forza *Bend* (*Kangaroo*) consente di simulare la rigidità del materiale, annullando l'angolo di piegatura tra i bordi del tassello. Inoltre, per ogni esagono vengono tracciate le diagonali interne, le quali vengono trasformate in molle mediante il componente *spring* (cfr. cap. VI). Il valore del parametro *stiffness* (rigidità), il cui controllo è consentito dal componente *spring* viene aumentato notevolmente per simulare la rigidità di tali elementi. (fig. 8.12)

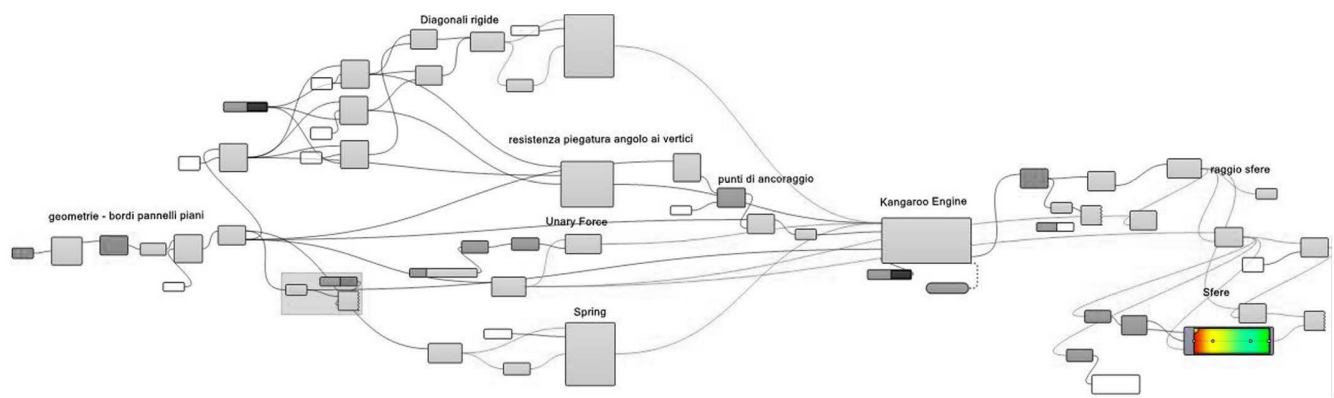
Infine, avviando la simulazione (motore *Kangaroo Engine*), tutti i punti attraverso cui la struttura è stata discretizzata sono stati sottoposti all'azione della forza di gravità, *Unary Force*, e cioè al peso proprio.

Il rilevamento dei punti soggetti a cedimento è stato reso possibile grazie ad una definizione costruita in maniera tale da visualizzare delle sfere, distribuite su tutto il sistema. In corrispondenza dei punti critici le dimensioni delle sfere aumentano ed il colore varia, passando dal blu al rosso. La variazione del raggio delle sfere corrisponde alla distanza tra i punti del sistema al tempo 0 ed i punti del sistema

deformato in seguito all'azione della forza (fig.8.11).
Concluso l'assemblaggio dell'involucro reale, i cedimenti previsti dal *Gravity test* in corrispondenza del varco si sono realmente verificati: è stato necessario sostenere il padiglione ricorrendo all'uso di cavi ancorati ai solai del soppalco presente all'interno dell'ambiente nel quale il *Cocoon Temporary Pavilion* è stato assemblato.



8.11

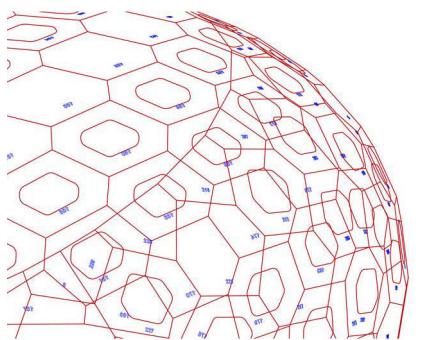


8.12

8.2.4 La Fabbricazione: tecnologia e materiale

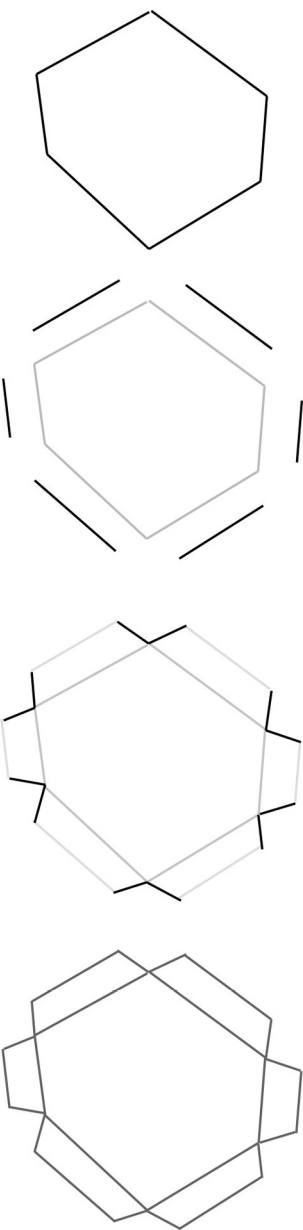
La planarizzazione delle celle è necessaria per procedere al taglio dei pannelli.
Il materiale scelto per la realizzazione del *Cocoon Temporary Pavilion*, prototipo di pensato per un ambiente indoor, è il cartone ondulato. Il cartone è un materiale che vanta una storia secolare, è completamente riciclabile e biodegradabile, se ne producono ogni anno milioni di tonnellate e oggi è sempre più coinvolto nel design e nei processi di produzione industriale.
Questo materiale è impiegato soprattutto nel settore degli imballaggi, e nella versione base è costituito da due superfici di carta piana (carte da copertina), dette copertine, che racchiudono una carta ondulata (carte da ondulazione), il tutto legato mediante l'utilizzo di collanti naturali. L'azione combinata delle due copertine piane con l'onda interna conferisce rigidità e resistenza al materiale. La qualità del prodotto finale dipende dalle caratteristiche meccaniche, legate alla grammatura ed al quantitativo di fibre contenuto nelle carte da copertina e nelle carte da ondulazione utilizzate per confezionare il materiale.¹⁷
Il tipo di cartone scelto per realizzare i pannelli è quello a tripla onda, dello spessore di 14 mm, di colore Havana.

I fogli di materiale vengono simulati in ambiente digitale disegnando un rettangolo avente lo stesso formato del pannello piano di materiale da sottoporre a taglio, di dimensioni pari a 1590 mm x 1190 mm.
Prima di distribuire i pannelli sul piano è importante assegnare un numero identificativo a ciascuno dei pannelli (fig.8.13), in maniera tale che, in fase di montaggio, ne sia riconoscibile la posizione rispetto agli elementi adiacenti.
Quindi, gli esagoni numerati sono stati distribuiti ordinatamente sul piano orizzontale x-y: questa operazione è resa possibile dal componente orient (*Grasshopper*), che consente la roto-traslazione degli oggetti rispetto ai piani coordinati: gli esagoni piani vengono, pertanto, "spostati" dall'involucro e distribuiti sul piano. (fig.8.15)
Dunque, è stato necessario progettare il sistema di assemblaggio degli elementi, rappresentato dalla creazione di apposite alette lungo i bordi di ciascun esagono. Tutte le alette, sei per ciascuno degli elementi, sono state generate contemporaneamente, applicando per

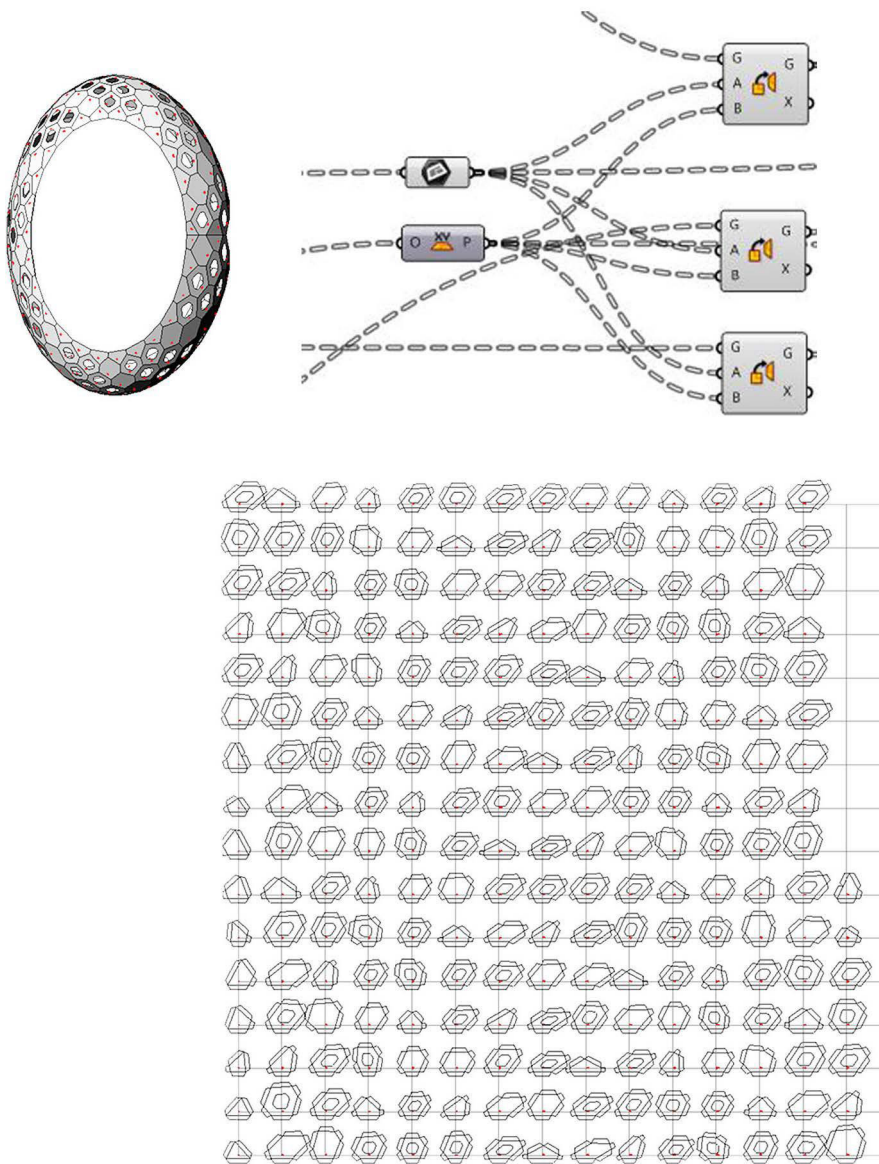


8.13

ciascuna lo stesso procedimento geometrico: ciò assicura che le coppie di alette costruite sui bordi di due esagoni adiacenti, una volta piegate, combacino perfettamente. (fig.8.14)
Il sistema prevede, per ogni lato dell'esagono, la creazione di un'aletta di 10 cm di larghezza che, opportunamente piegata e forata, consente l'unione dei pannelli adiacenti attraverso l'uso di semplici fascette in plastica (fig.8.16). Tale operazione è fondamentale per consentire, in fase di montaggio, la giunzione degli esagoni, in ma-



8.14

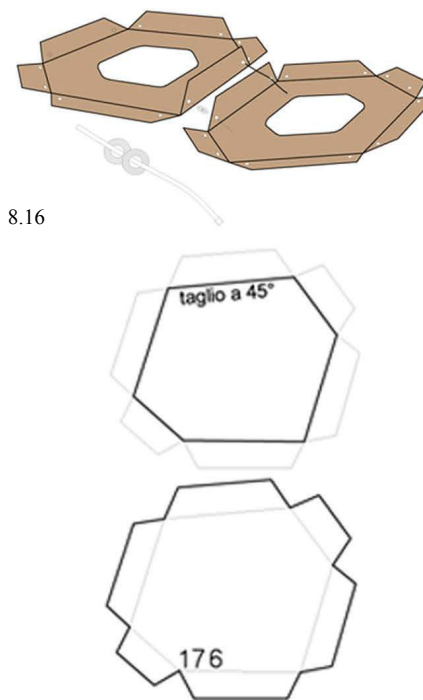


8.15

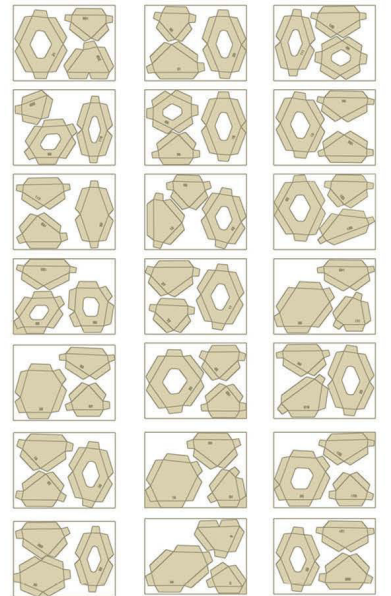
niera tale da ricomporre la forma originaria dell'involucro.
Infine, il nesting¹⁸ dei pannelli, realizzato con il *plug-in Rhino Nest*, ha permesso di evitare sprechi di materiale ottimizzando la distribuzione e l'orientamento dei pezzi all'interno delle dimensioni massime del pannello di materiale da sottoporre a taglio. (fig.8.17)
In totale, sono stati necessari 83 fogli di cartone per ottimizzare la distribuzione dei 231 pezzi.
Per la fabbricazione dei pannelli è stata coinvolta un'azienda locale, la CRTS Cartotecnica.¹⁸
La fresatrice usata per il taglio è una cutter di piano 200cm x 200 cm dotata di punta seghettante e cambio utensile manuale e capace di effettuare cordonatura e tagli a 45°. Il tempo totale necessario per il taglio di tutti i pannelli, pieni e forati, è stato 4 ore e 20 minuti.¹⁹
Grazie al taglio a 45° effettuato all'interno degli spigoli di giunzione tra le alette e i pannelli esagonali, è stato possibile piegare le alette a 90 gradi intorno all'intero perimetro del pannello.

8.2.5 Il Montaggio

Alla fase di fabbricazione segue la fase di controllo e di assemblaggio dei pannelli in cartone ondulato. Come anticipato, il prototipo del *Cocoon Temporary Pavilion* è stato montato all'interno della Mediateca MARTE di Cava de' Tirreni. (fig. 8.20)
E' stato necessario tracciare sul pavimento l'ellisse di base necessaria allo scopo di individuare l'area che sarebbe stata poi occupata dal padiglione e lungo la quale iniziare a disporre la prima fila di pannelli (figg.8.19,8.20).
Una volta trasportati tutti i pezzi all'interno della *location* è stato necessario ripulire i tagli a 45°, eliminando manualmente i pezzi di cartone presenti tra i bordi dei pannelli e le alette.
Il team è stato suddiviso in due squadre per dividere i pannelli, i quali sono stati raggruppati in gruppi di decine. Questo accorgimento è stato utile per rendere i pezzi più facilmente reperibili al momento dell'assemblaggio. I pannelli esagonali sono stati quindi uniti congiungendo le alette, corrispondenti.
Per unire le coppie di alette corrispondenti è stato necessario creare due fori per ciascuna di esse ed utilizzando, per ognuna, 4 fascette in



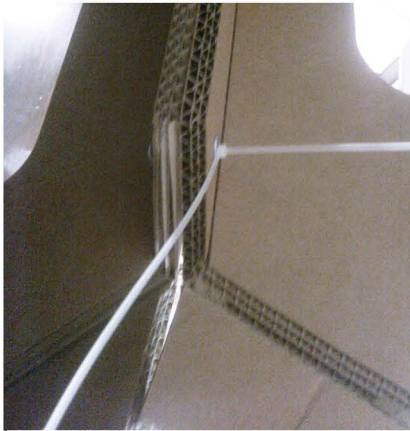
8.16



8.17



a



b



e

plastica e 4 anelli metallici. (fig.8.18)
Dunque, tutto l'occorrente per montare l'intero padiglione consiste complessivamente in 1500 fascette in plastica, 1500 anelli metallici ed un trapano, utilizzato per forare più agevolmente il cartone. Per completare l'assemblaggio sono stati necessari 2 giorni, durante i quali il team ha lavorato per circa 10 ore.²⁰ Infine il padiglione è stato scelto come spazio per accogliere delle performance musicali, dimostrando le ottime prestazioni acustiche della struttura: grazie alla forma e al materiale scelto essa è capace di condensare un suono pulito e morbido²¹



c



f

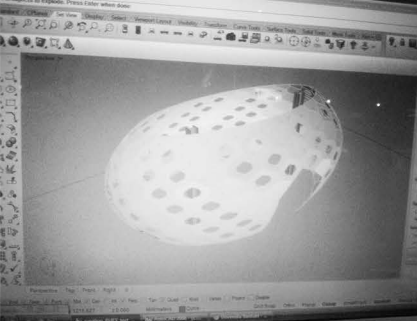
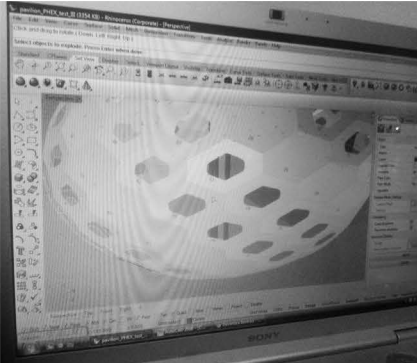
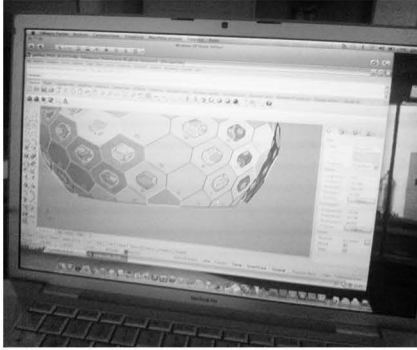


d

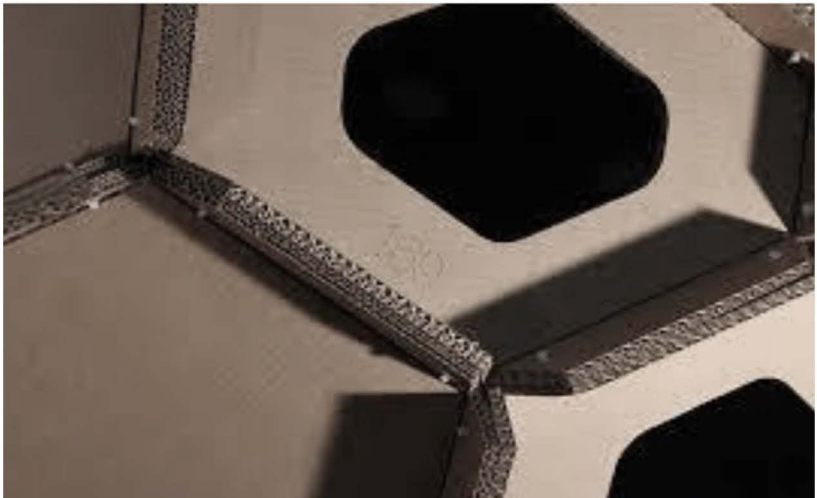
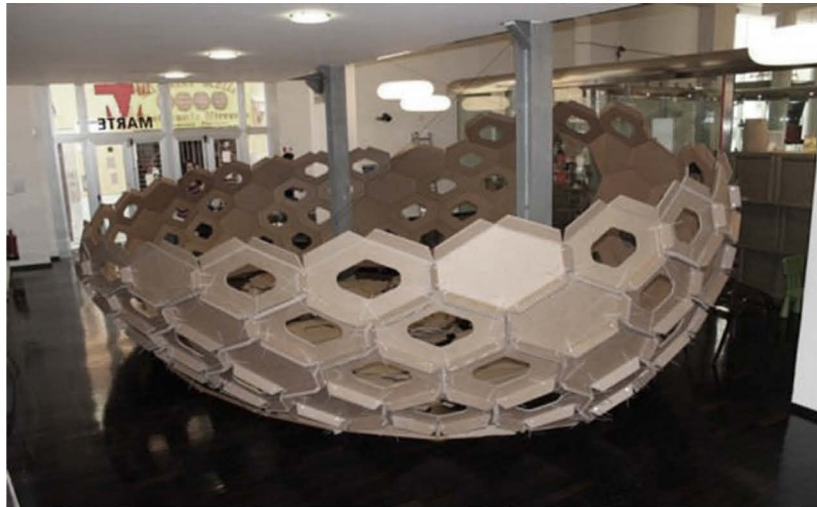


g

8.18a,b,c,d - L'assemblaggio dei pannelli
8.19e,f,g - Fasi di montaggio



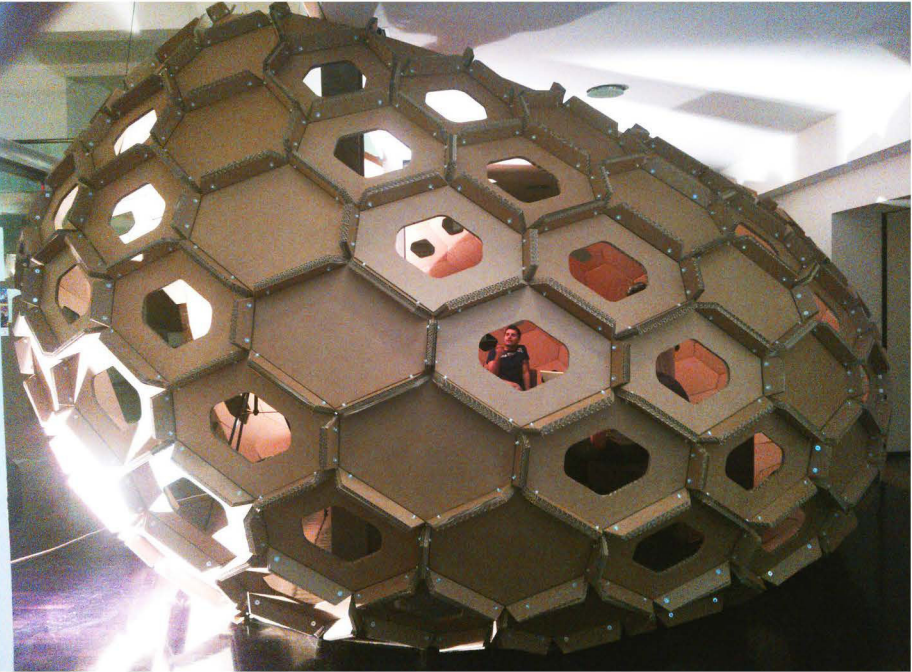
8.20 - La sequenza di immagini mostrano la fase di montaggio.



8.21 - Foto d'insieme e particolare del prototipo.



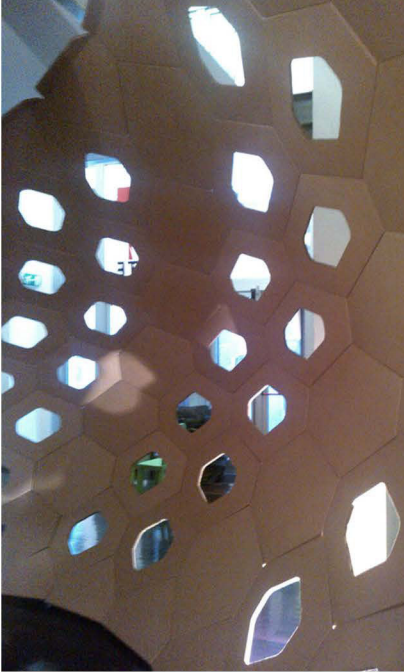
a



b



c



d

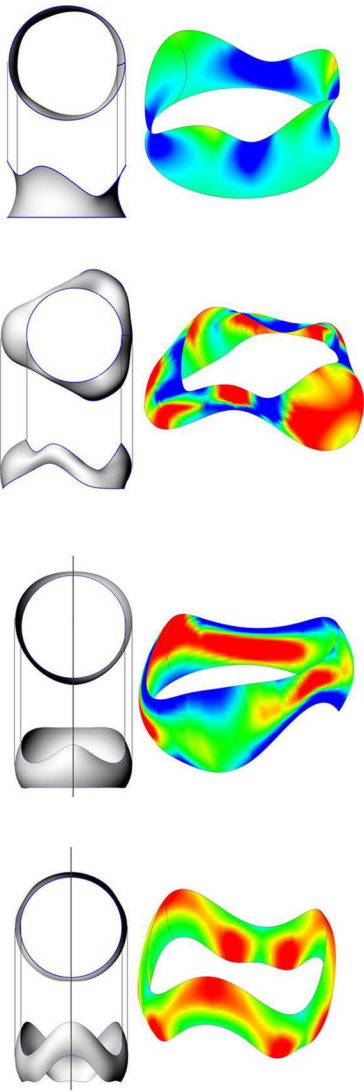
8.22a,b - Il *Cocoon Temporary Pavilion*.
8.23c,d - Particolari del prototipo.

8.3 Il Cocoon Evo Pavilion: l'evoluzione

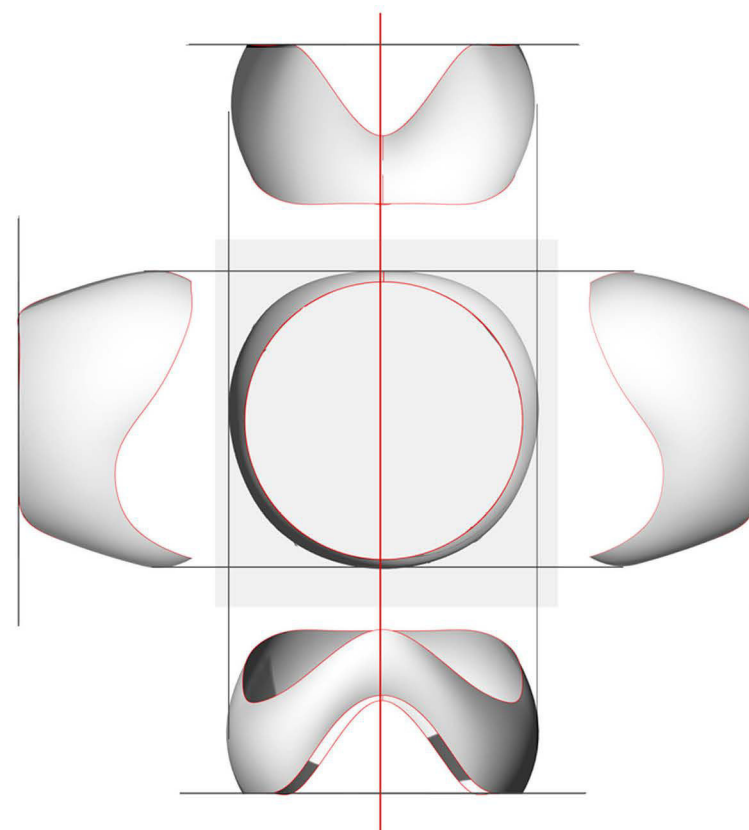
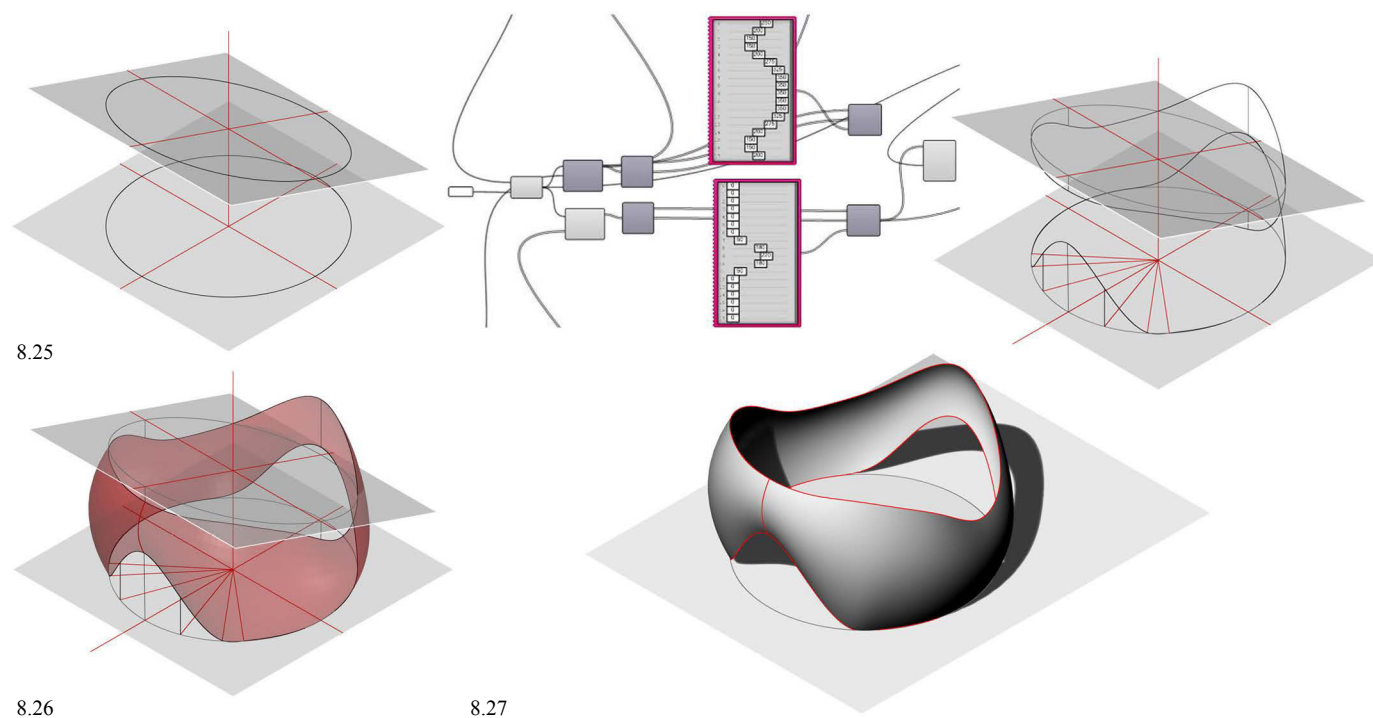
Il Cocoon Evo Pavilion è l'evoluzione del Cocoon Temporary Pavilion, ed è l'esito della ricerca proseguita dai due centri coinvolti allo scopo di migliorare i risultati ottenuti dalle fasi di progettazione, di produzione e di assemblaggio del primo prototipo. L'obiettivo principale è sempre rappresentato dall'esplorazione delle tecniche di tassellazione di superfici curve in esagoni piani: la nuova sfida era quella di risolvere le problematiche riscontrate per il primo prototipo mirando ad ottenere un sistema discreto autoportante. Il Cocoon Evo Pavilion è stato realizzato grazie alle tecnologie, alle macchine ed alla professionalità dello staff di un'altra azienda locale, la TEKLA S.r.l.²²

8.3.1 La ricerca della forma

La forma del padiglione è stata tracciata considerando la necessità di inserire due varchi di passaggio, individuati lungo l'asse di simmetria della struttura. Dunque, a differenza del primo prototipo, non è stato successivamente necessario rimuovere alcun pannello: questa scelta si è determinata importante per ottimizzare il comportamento statico della struttura. Come per il Temporary Pavilion, anche in questo caso il primo passo è stato quello di testare differenti configurazioni formali (fig.8.24) e la relativa fattibilità in termini di planarizzazione dei pannelli esagonali. Pertanto, di ogni superficie modellata mediante l'analisi della curvatura è stata verificata la possibilità di discretizzazione e planarizzazione in esagoni convessi. Per ricavare la forma finale, le ellissi superiore ed inferiore del precedente prototipo sono state suddivise in punti e parte di essi sono stati traslati lungo l'asse z per definire le curve di profilo del nuovo involucro e per delineare i varchi di passaggio (fig.8.25). La superficie è stata generata eseguendo uno sweep su due binari, i quali coincidono con le due curve di profilo superiore ed inferiore (fig. 8.26). La proiezione a terra della forma ottenuta è un'ellisse i cui assi misurano 637 cm e 666 cm., mentre l'altezza massima è di 351 cm. (fig.8.27) Il padiglione presenta due aperture assiali di altezza massima pari a 222 cm.²³ (fig.8.28)



8.24 - La ricerca della forma attraverso l'analisi della curvatura gaussiana delle soluzioni generate.

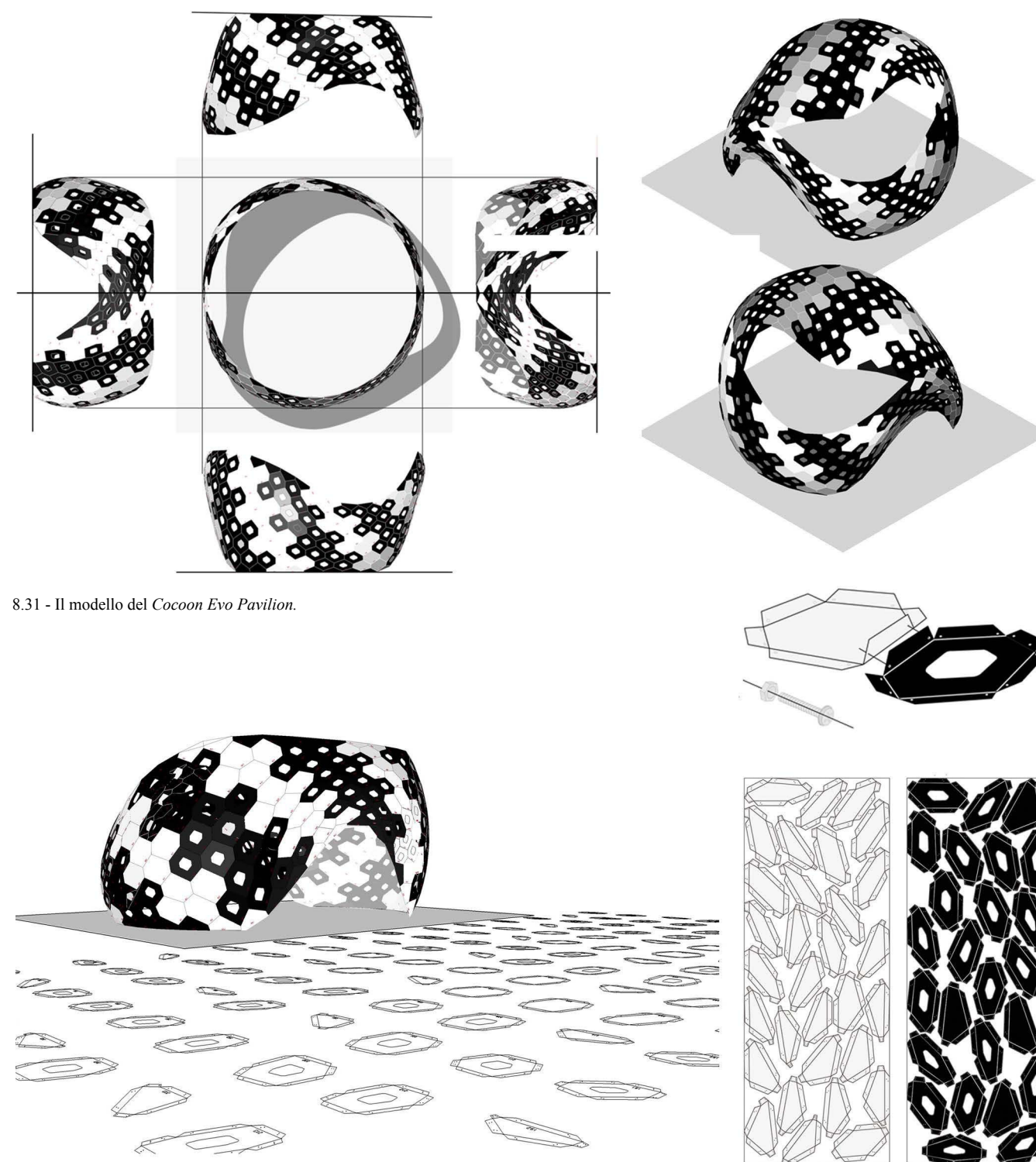
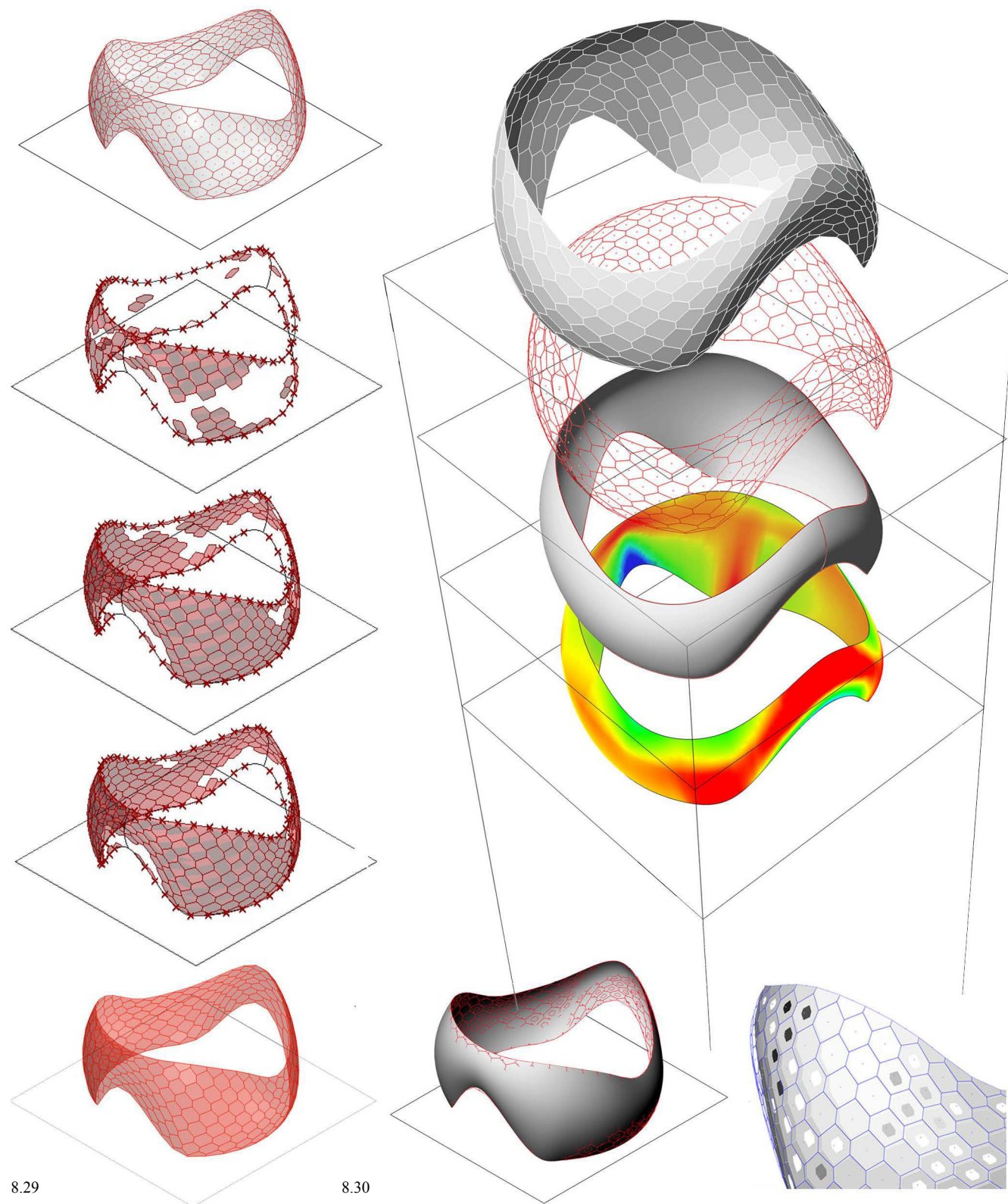


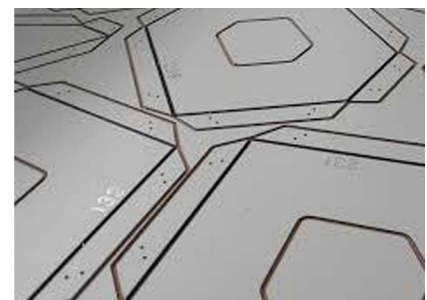
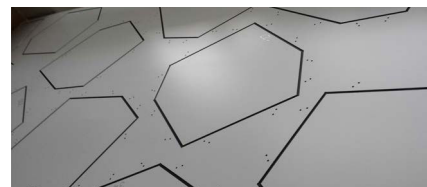
8.3.2 La Discretizzazione: *hexagonal paneling*

Sempre grazie all'uso di *Lunch Box* e *Kangaroo*, (*Grasshopper*), sono state imposte le condizioni necessarie per computare la discretizzazione e la planarizzazione delle varie soluzioni elaborate (fig.8.29). In particolare, come per il caso precedente, di tutte le soluzioni ottenute sono stati verificati il numero di iterazioni necessarie per completare il processo di planarizzazione, il numero dei pezzi, il risultato in termini di qualità della planarità di tutte le superfici, la deformazione di ciascuno dei pannelli e l'approssimazione della superficie iniziale. Scelta la configurazione finale del padiglione (fig.8.30), sono state elaborate delle ulteriori verifiche, tra cui l'influenza dell'unità di tolleranza,²⁴ il tempo di rilassamento della struttura ed il peso e la dimensione massima del numero finale di pannelli.²⁵ Il risultato di questa serie di valutazioni è un modello caratterizzato da una suddivisione Honeycomb di $80 u \times 8 v$, per un totale di 360 pannelli planarizzati utilizzando un'unità di tolleranza 0,01 cm. La superficie totale dell'involucro è pari a 50,31 mq.²⁶ Come per il *Cocoon Temporary Pavilion*, anche in questo caso si è ritenuto utile ed interessante lavorare sulla leggerezza e sulla permeabilità della struttura, forando un certo numero di pannelli. Pertanto, sul sistema discreto ricavato, sono stati nuovamente sperimentati i risultati di un altro studio in corso presso il centro di ricerche Co-de-iT, *'Pattern seeker'*.²⁷ I pannelli si dividono tra esagoni pieni e bianchi ed esagoni neri e forati. (fig.8.31,34)

8.3.3 Il *Gravity test*: un sistema autoportante

Rispetto al primo padiglione, il *Cocoon Evo Pavilion* si presenta come una struttura maggiormente complessa da testare, sia per le nuove condizioni morfologiche, sia per l'ambizione di raggiungere un risultato più completo e prestante rispetto a quelle ottenute per il primo prototipo. L'intenzione è stata quella di indagare il comportamento strutturale delle parti a sbalzo, allo scopo di valutare e verificare delle nuove opportunità progettuali. Come per il *Cocoon Temporary* è stata eseguita una pre-valutazione del comportamento strutturale del sistema, basata sull'azione del peso proprio, allo scopo di verificare la natura e l'intensità delle deformazioni che questo subiva.²⁸





8.33



8.34

8.3.4 La Fabbricazione: tecnologia e materiale

Per ottenere delle prestazioni qualitativamente superiori si è pensato di utilizzare un materiale diverso:

grazie alla collaborazione ed alla disponibilità dell'azienda *TEKLA srl*, per fabbricare i pannelli che compongono il *Cocoon Evo Pavilion* è stato scelto come nuovo materiale l'*Etalbond PE White/Black*.

Questo prodotto²⁸ consente la fabbricazione di superfici piane e curve, realizzabili in diversi colori. (fig.8.34)

E' un materiale composito rigido, leggero e resistente e ha buone proprietà isolanti. Inoltre, è creato nel pieno rispetto delle norme antincendio. I fogli di *Etalbond* sono prodotti in diversi spessori: il nucleo può misurare due, tre e cinque mm, ed è racchiuso tra due fogli di alluminio. Lo spessore totale del pannello sarà, quindi, pari a tre, quattro e sei mm. L'incollaggio dei due fogli di alluminio con il nucleo si ottiene comprimendo i tre strati ottenendo un unico foglio piano e rigido.²⁹

Per riprodurre il pattern degli elementi pieni e forati sono stati utilizzati dei fogli di *Etalbond* di colore nero e di colore bianco.

Successivamente alla fase di *nesting* (fig.8.32,33), necessario per ottimizzare la distribuzione dei 360 pannelli sul foglio di Etalbond di dimensioni pari a 4 x 1500 x 4000 mm, il taglio degli elementi è stato effettuato sempre mediante una fresatrice CNC.³⁰ (fig.8.33)

La macchina utilizzata è una fresatrice a 3 assi di piano 400cm x 150cm. La lunghezza di taglio è pari a 1294,75 metri.³¹

Il tempo totale necessario per il taglio di tutti i pezzi è stato di 24 ore, divise in 3 giorni.³²

Per fabbricare il numero complessivo di pannelli sono stati necessari 65 mq di materiale, divisi per un numero di 18 fogli, con una percentuale di utilizzo effettivo del 68%, e quindi con uno scarto pari al 32%. Il peso totale del padiglione è di circa 250 kg.³³

8.3.5 Il Montaggio

Grazie alla duttilità del materiale è stato possibile realizzare il sistema di giunzione dei pannelli sfruttando la stessa soluzione sperimentata per il *Cocoon Temporary Pavilion*, cioè tramite semplice piegatura delle alette costruite lungo i bordi dei pannelli esagonali. (fig.8.36a,b,c)

Su ognuna delle alette sono stati quindi realizzati quattro fori per l'alloggiamento dei dadi e dei bulloni necessari per assicurare l'adesione tra i pezzi. Sono stati usati bulloni e relativi dadi tipo M-8, di diametro 5 mm, lunghezza 16 cm e forniti di rondelle. (fig. 8.36a,b,c) Anche in questo caso, per il montaggio dei pezzi è stato necessario posizionare prima gli esagoni di base e poi procedere con il completamento di tutti i giri in modo da consentire la chiusura dell'anello, a mano, a mano che la struttura cresceva in altezza. Il padiglione è stato ancorato alla base con un sistema di piattine in acciaio, necessarie per fissare le alette di bordo della prima fila di esagoni, quindi adiacenti al suolo. (fig.8.35)

Le piattine sono state fissate con 4 viti tipo fisher, diametro 10 mm. Il montaggio del padiglione è stato effettuato in 3 giorni, da tre persone, per un tempo quotidiano di 8 ore di lavoro.³⁴

E' interessante sottolineare che, per questioni di natura estetica, nel *Cocoon Evo Pavilion* le alette sono state piegate verso l'interno, mentre nel primo prototipo le alette sono state piegate verso l'esterno, mostrando quindi il sistema di giunzione.

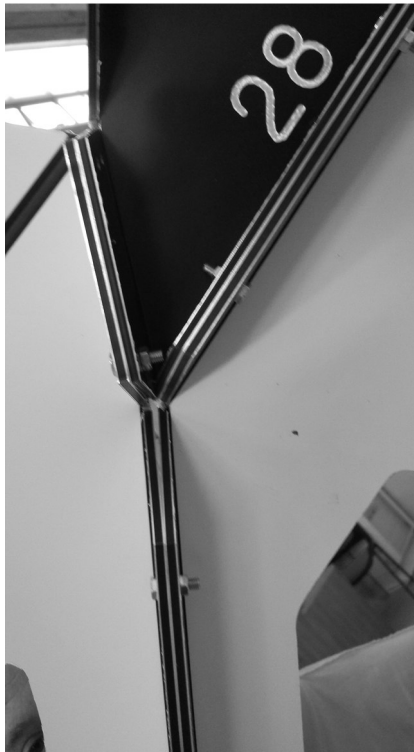
Questo accorgimento ha consentito di ottenere una superficie discreta coerente con la continuità e la curvatura della forma complessa progettata, oltre che di sperimentare un sistema di giunzione sicuramente più prestante rispetto a quello studiato per il primo prototipo, il quale prevedeva la piegatura e la giunzione delle alette all'estradosso dell'involucro.



8.35



a



b



c

8.36a,b,c - Piegatura e assemblaggio delle alette.
8.37d,e,f - Fase di montaggio.



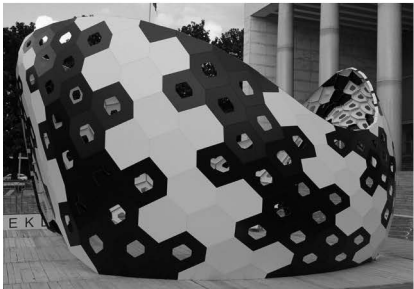
d



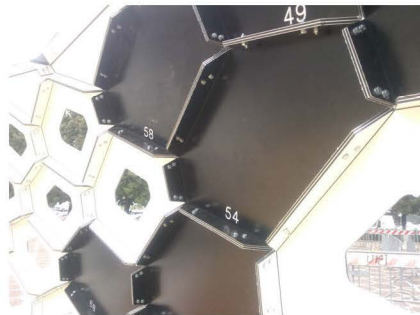
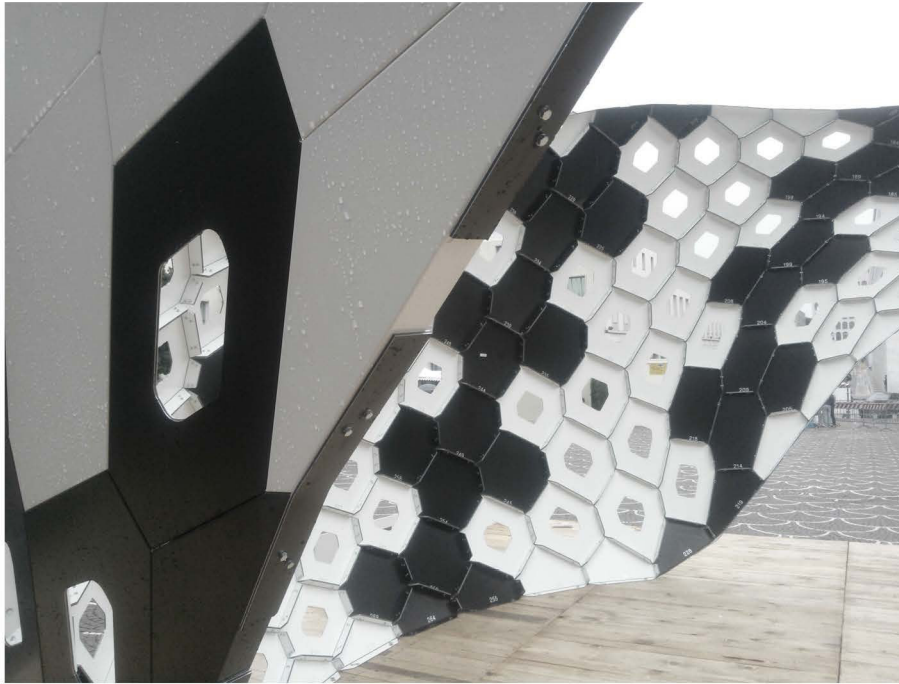
e



f



8.38 - Esposizione del Cocoon Evo Pavilion all'ingresso della *Maker Faire* (Roma, 2013).
8.39,40,41,42,43 - Foto del Padiglione.



8.44 - Sequenza di particolari del *Cocoon Evo Pavilion*.



Note

- ¹ <http://www.medaarch.com/>
- ² <http://www.co-de-it.com/>
- ³ <http://www.medaarch.com/formazione/>
- ⁴ <http://www.co-de-it.com/wordpress/info>
- ⁵ <http://www.medaarch.com/chi-siamo/>
- ⁶ *PicernocerasoLab: la digital fabrication sposa il cartone* | *MakeTank* - blog.maketank.it/it/2013/10/picernoceraso-cartone/, p.1
- ⁷ <http://www.chefuturo.it/agenda/maker-faire-roma/>
- ⁸ *PicernocerasoLab: la digital fabrication sposa il cartone* | *MakeTank* - blog.maketank.it/it/2013/10/picernoceraso-cartone/, p.1
- ⁹ Architetto, CEO presso *Medaarch* e *Mediterranean FabLab*, <http://www.inarchedu.it/amleto-picerno-ceraso/>
- ¹⁰ Andrea Graziano, architetto, *computational designer*, *digital explorer*, è *co-founder* di *Co-de-iT* (*Computational Design Italy*), <http://www.co-de-it.com/wordpress/info/andrea-graziano>
- ¹¹ Il gruppo che ha collaborato con i membri del *Mediterranean FabLab* alla realizzazione del padiglione è composto da Emanuela Lanzara (architetto), Antonia Gravagnuolo (architetto), Amedeo Di Marco (ingegnere), Daniela Scovotto (architetto), Gessica Fiorillo (architetto), Alessio Palmieri (studente DIARC)
- ¹² Le Ciclidi di Dupin sono particolari superfici quartiche, e possono essere definite in vari modi. Le Ciclidi derivano dall'inviluppo di tutte le sfere tangenti a tre sfere fisse, oppure sono generate dall'inviluppo di sfere con centri su una conica e tangenti ad una sfera fissa. Queste superfici sono anche caratterizzate dalla proprietà che tutte le loro linee di curvatura sono cerchi o linee rette. Un esempio semplice di Ciclide è il Toro generico. A seconda che l'asse intorno a cui ruota il cerchio sia esterno, secante o tangente al cerchio stesso, si ottiene un Toro ad anello, un Toro a fuso oppure un Toro a corno. Anche la Sfera, che può essere vista come caso particolare di Toro in cui l'asse di rotazione è passante per un diametro del cerchio, è un esempio di Ciclide, da Ciclidi di Dupin, Università di Pavia, Dipartimento di Matematica, <http://www-dimat.unipv.it/~olivati/IV-4-14/IV-4-14.html>
- ¹³ cfr. cap. VI, par. 6.2
- ¹⁴ *Ibidem*
- ¹⁵ *Planar Hexagons Kangaroo* - Reply by Daniel Piker: planarize_polygons.gh <http://www.grasshopper3d.com/forum/topics/planar-hexagons-kangaroo>
- ¹⁶ Sono state analizzate tutte le combinazioni derivanti da un unico pattern a sequenza binaria

¹⁷ http://it.wikipedia.org/wiki/Cartone_ondulato

¹⁸ cfr. cap. IV, par. 4.6

¹⁹ <http://cartotecnica.acrts.com>

²⁰ *Cocoon/ A Temporary Pavilion / Medaarch / code.it* - Posted in University / Research - Mediterranean Fab Lab by Mediterranean academy of architecture, (08 luglio 2013)
www.formakers.eu/project-861-medaarch-co-deit-cocoon-a-temporary-pavilion, p. 9

²¹ *Ibidem*

²² http://www.finestraitaliana.it/pvc-serramenti-finestre_veka/salerno/tekla_84.html

²³ *Cocoon Evo Pavillion | Medaarch.com*, p.3
www.medaarch.com/2462-cocoon-evo-pavillion/

²⁴ La forme e le dimensioni di un oggetto disegnato rappresentano delle condizioni ideali, pertanto, è necessario indicare i limiti massimi di variabilità consentiti (tolleranze), entro i quali è possibile accettare i pezzi e garantire il corretto accoppiamento dei componenti.

²⁵ Il materiale scelto per il *Cocoon Evo Pavilion* è l'*Etalbond*.

²⁶ *Co-de-it, Cocoon Evo Pavilion*, (4 ottobre 2010)
www.co-de-it.com/wordpress/cocoon-evo-pavilion.html, p.2

²⁷ *Pattern Seeker* è una ricerca attualmente in corso presso Co-de.iT sulle modalità di immagazzinamento e comunicazione di informazioni attraverso la generazione di pattern per l'esplicitazione della struttura di dati impliciti in un modello 3d - Co-de-it, Cocoon Evo Pavilion, www.co-de-it.com/wordpress/cocoon-evo-pavilion.html, p.8

²⁸ <http://www.elval-colour.com/en/products-etalbond>, p. 1

²⁹ *Ibidem*

³⁰ *Co-de-it, Cocoon Evo Pavilion*, (4 ottobre 2010)
www.co-de-it.com/wordpress/cocoon-evo-pavilion.html, p.2

³¹ *Ibidem*

³² *Cocoon Evo Pavillion | Medaarch.com*, p.6
www.medaarch.com/2462-cocoon-evo-pavillion/

³³ *Ibidem*, p.5

³⁴ *Maker Faire Rome: Cocoon Evo Pavillion / Mediterranean FabLab + Co-de-iT + PicerinoCerasoLab + Tekla*, www.formakers.eu/project.php?id=9438, pp. 3-4

Sperimentazioni e proposte

*La obras mejor
es la que sostiene por su forma*

Edoardo Torroja

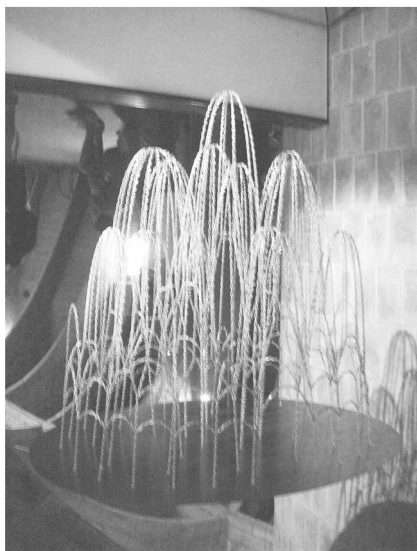
9.1 Osservazioni

Creatività ed invenzione nascono da relazioni che il pensiero fa con ciò che conosce: è la possibilità di innescare relazioni, favorite dalla conoscenza, che genera l'innovazione.¹

Le riflessioni scaturite dall'osservazione del campione analizzato, dai casi studio analizzati in dettaglio e dagli esperimenti condotti, hanno consentito di individuare una serie di approcci rivolti all'ottimizzazione delle superfici complesse, basati:

- sull'osservazione e manipolazione della curvatura Gaussiana delle superfici;
- sulla ricerca di simmetria nelle forme;
- sull'ottimizzazione delle relazioni tra la forma (curvatura gaussiana) ed i pattern (distribuzione di pannelli piani, curvi e reti di curve);
- sulla generazione di forme complesse mediante:
 - applicazione di leggi composte,
 - composizione o raccordo di superfici analitiche.

Dagli studi e dalle sperimentazioni condotte si evince che le superfici con curvatura gaussiana prevalentemente positiva rispondono meglio alla discretizzazione mediante pannelli esagonali piani e che le



9.1 - Catenaria, A. Gaudì
9.2 - Modello fisico di membrana invertita, H. Isler,

superfici con curvatura gaussiana prevalentemente negativa o nulla (o di entrambe i tipi) rispondono meglio alle tecniche di distribuzione di pannelli cilindrici o di strisce sviluppabili, senza apportare profonde alterazioni di carattere formale alla superficie continua di partenza.² Pertanto, si è ritenuto fondamentale effettuare un'ulteriore sperimentazione basata sull'utilizzo di tali tecniche di razionalizzazione, i cui vantaggi sono stati più volte sottolineati nell'ambito di questa trattazione. Lo scopo delle prove eseguite e schedate all'interno di questo capitolo è quello di sperimentare ed applicare gli strumenti digitali e le tecniche attualmente disponibili per agevolare i processi di ricerca e di gestione delle forme complesse allo scopo di ottimizzarne fattibilità e prestazioni. Computare e verificare le possibili soluzioni "a priori" consente di modellare la forma degli edifici in modo dinamico e performante. Le forme complesse non rappresentano, dunque, solo l'espressione di una nuova estetica, o un particolare momento culturale e socio-economico generato dalla rivoluzione digitale, ma possono essere considerate il luogo per sperimentare e ottimizzare le soluzioni mirate alla realizzazione di un'architettura sostenibile.

La sfida consiste nel coniugare la fase di design con i sistemi di *paneling* ritenuti più idonei per il raggiungimento di tale obiettivo.

La crescente complessità della progettazione architettonica contemporanea richiede lo sviluppo di approcci ponderati che mirino all'ottimizzazione dei processi e alla minimizzazione delle risorse disponibili. L'obiettivo è gestire il processo già a partire dalla fase creativa dell'opera, affinché la fattibilità della stessa non venga compromessa. A tale proposito, è interessante visualizzare come varia la distribuzione della curvatura gaussiana di superfici generate mediante l'applicazione di tecniche di *digital form finding*. Simulando tali tecniche, gli strumenti parametrici veicolano la forma fondendo la fase creativa con quella di analisi strutturale: è la struttura stessa a definire la propria forma, la quale coinciderà con la condizione di equilibrio del sistema sottoposto all'azione di carichi applicati. All'interno della ricerca, la sperimentazione delle tecniche di *form finding* è avvenuta tanto attraverso la realizzazione di modelli materiali, quanto attraverso l'applicazione degli appositi strumenti computazionali attualmente disponibili per la simulazione di tale approccio.

Dalle catenarie di Gaudì (fig.9.1), alle membrane invertite di Heinz Isler (fig.9.2), il modo per ottimizzare la ricerca della forma, prima

dei recenti sviluppi in ambito parametrico-computazionale, era la realizzazione di modelli fisici.

Tuttavia, uno degli aspetti più interessanti, che caratterizza e favorisce l'uso degli strumenti computazionali, consiste nella possibilità di osservare e di modificare le trasformazioni morfologiche del sistema in tempo reale.

9.2 *Digital Form finding & Paneling*

A conclusione del percorso di ricerca, si è dunque ritenuto utile sperimentare i metodi di *digital form finding* per coniugare la genesi di superfici ottimizzate dal punto di vista morfologico - strutturale con le proprietà dei sistemi discreti e semi-discreti e dei pattern indagati. L'ipotesi è che i processi che favoriscono la deformazione globale di una superficie generino dei cambi di curvatura graduale a cui corrisponderà un pattern di curve più regolare e forme dotate di maggiore simmetria, aspetto che, come più volte è stato sottolineato, agevola l'ottimizzazione e la fattibilità di tali forme.

Ciò conferma e sottolinea l'utilità dei metodi di *form finding* per la generazione di geometrie complesse, evitando il ricorso a delle tecniche di modellazione o di editing della forma che potrebbero comportare delle scomode approssimazioni locali e brusche variazioni della curvatura delle superfici.³ L'approccio mira alla simulazione di forze fisiche applicate ai punti e alle curve che discretizzano una superficie di partenza. La conseguente deformazione di tale sistema permette di generare diverse configurazioni formali. La simulazione digitale consente di modificare le forme in maniera interattiva e di visualizzare in tempo reale la distribuzione della curvatura gaussiana delle superfici estratte da tali configurazioni.

Tra i *digital tools* del plug-in *Kangaroo (Grasshopper)*, per simulare le tecniche di *form finding* sono stati applicati i seguenti componenti/forza (fig.9.3,4,5):

Unary Force, per simulare il comportamento delle membrane invertite;

Pressure per simulare il comportamento delle strutture pneumatiche;

Catenary, per simulare il comportamento delle curve catenarie.

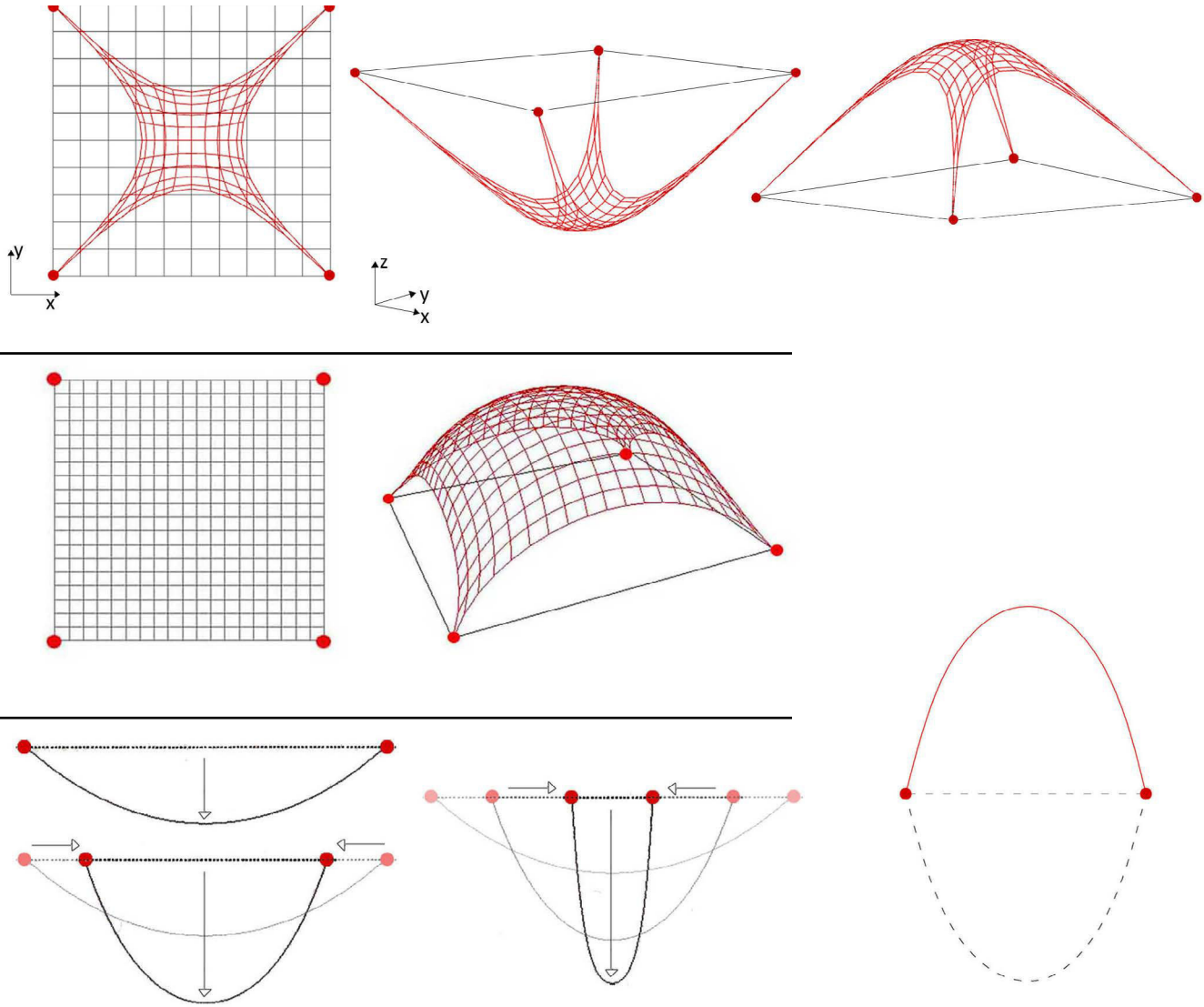
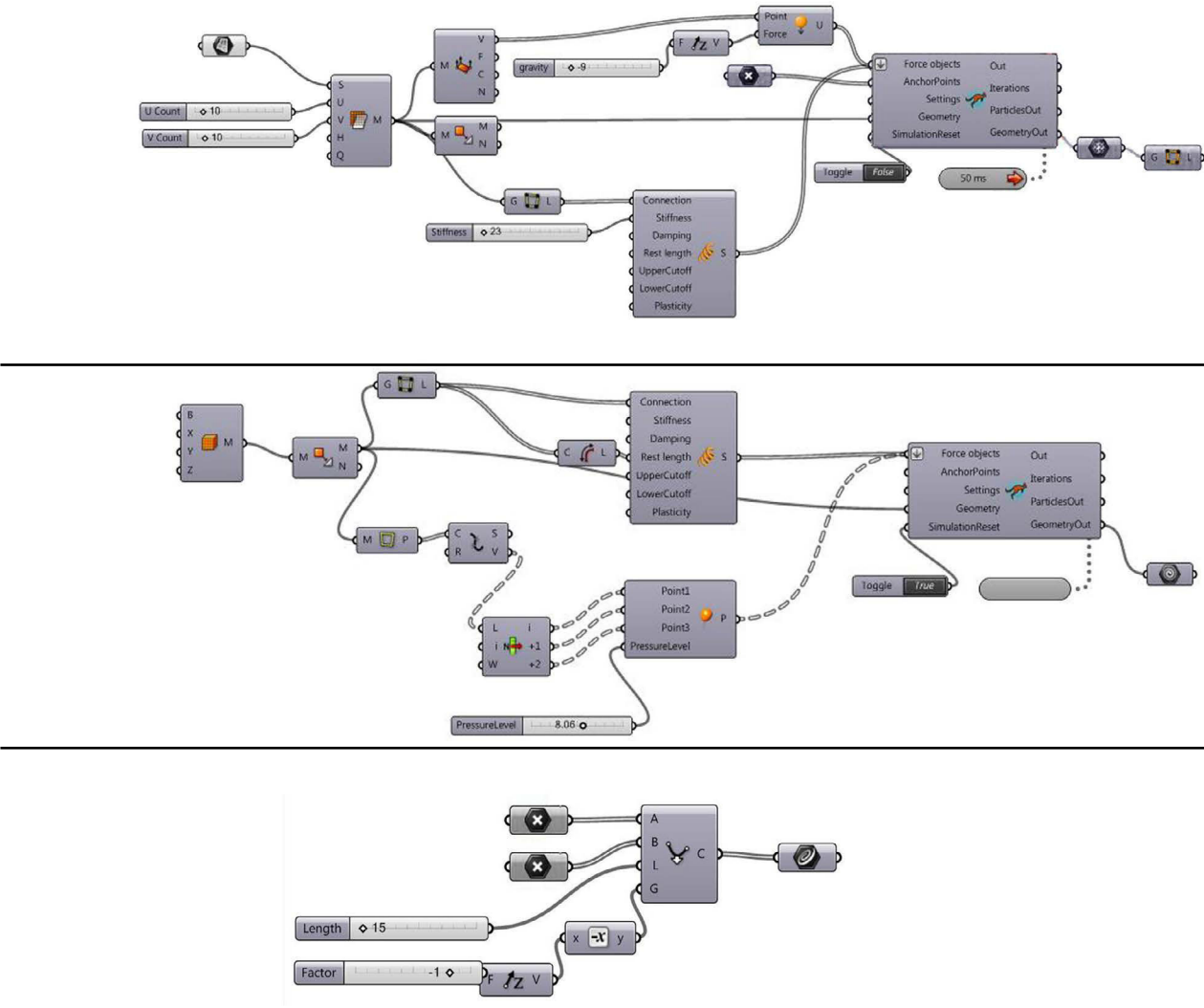
In seguito all'azione delle forze ed in base al tipo di simulazione che si desidera realizzare, un sistema discreto e piano di partenza si

9.3,4,5 - Digital Form finding (Grasshopper-Rhino):
Unary Force, Pressure, Catenary

trasformerà in una membrana rilassata (*Unary Force*), pressurizzata (*Pressure*), oppure in un sistema di cavi “appesi”, o catenarie (*Catenary*). (fig.9.3,4,5) Più precisamente, l’approccio utilizzato per le seguenti prove è quello di sottoporre all’azione delle forze virtuali una serie di superfici NURBS plane dal bordo curvo o poligonale, successivamente suddivise in un numero regolare di elementi triangolari o quadrilateri, dunque trasformate in *mesh* (membrane), oppure un sistema di curve ancorate agli estremi (catenarie). Analogamente a quanto accade per il processo di planarizzazione (Cfr. cap VI), la *mesh* decomposta in punti e segmenti, attraverso l’apposito componente *spring* (“molla”) viene trasformata in un sistema elastico.

La simulazione dell’azione delle forze avviene mediante l’applicazione di vettori su ciascuno dei punti che compongono il sistema discreto ed elastico. La direzione del vettore dipende dal tipo di forza simulata.

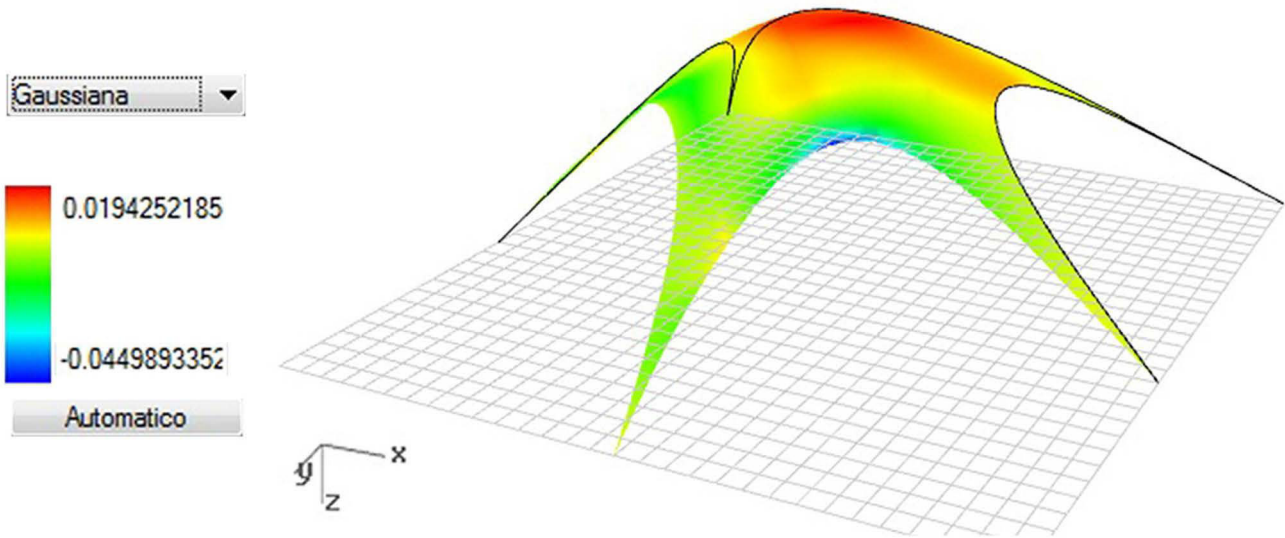
E’, inoltre, necessario indicare i punti di ancoraggio del sistema, o *anchor points*, quegli elementi cioè che rimarranno fissi durante la simulazione. Infine, i punti, le connessioni lineari, le forze, gli *anchor points* ed un *timer*, sono collegati al motore di simulazione: avviando il processo le particelle si “muovono” fino a raggiungere lo stato di equilibrio e le mesh plane e rigide si trasformano in sistemi rilassati ed elastici.



9.2.1 Membrane invertite & *hexagonal paneling*

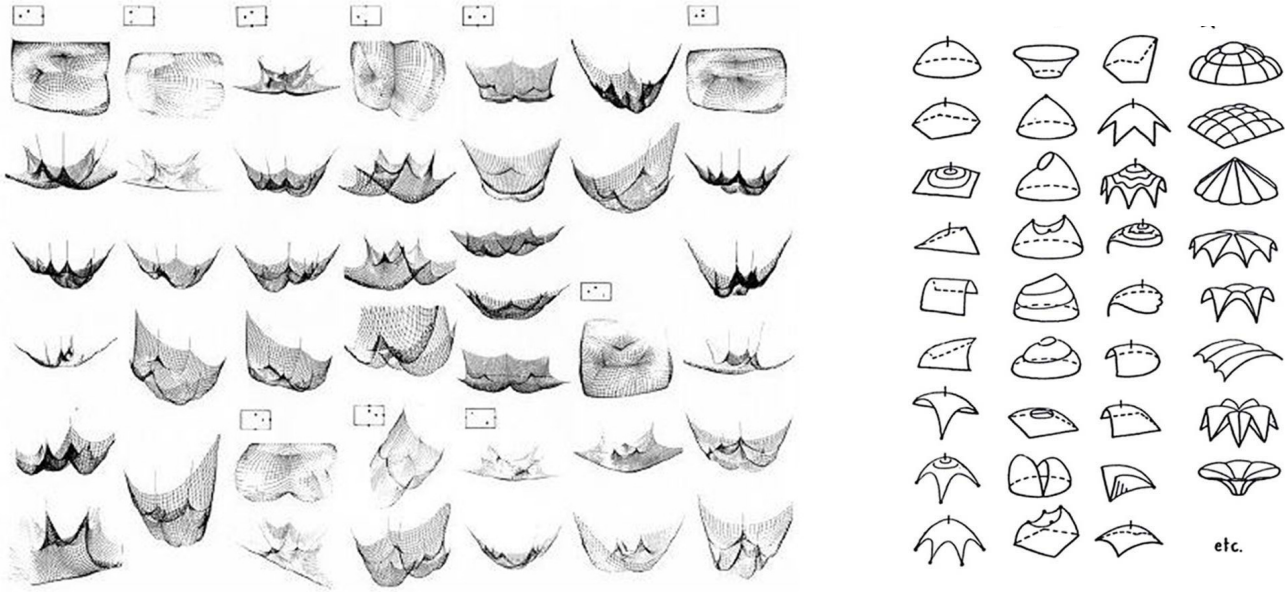
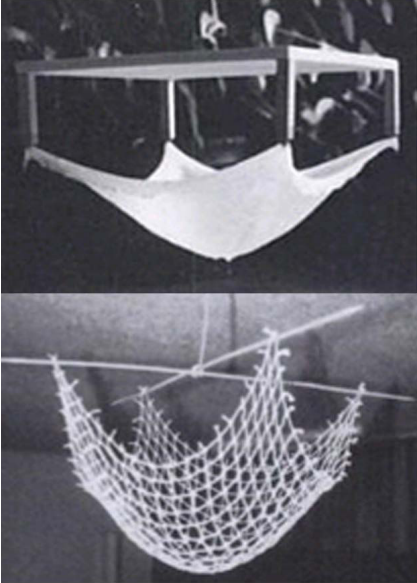
Lo scopo delle seguenti applicazioni è quello di sfruttare le tecniche di *form finding* per la ricerca di superfici a curvatura prevalentemente positiva, idonee per consentire la planarizzazione delle celle esagonali sghembe distribuite sulla superficie. Come dimostrato nei capitoli precedenti, tale curvatura permette di conservare la regolarità geometrica degli elementi, favorendo la chiara riconoscibilità del pattern esagonale. Dall'analisi del campione (cfr. cap. IV) emerge che l'uso del *pattern* esagonale per il *paneling* di superfici complesse è attualmente oggetto di studi e di ricerche, ma è fisicamente ancora molto poco utilizzato, nonostante i numerosi vantaggi elencati e le note proprietà di *offset*, necessarie per la realizzazione di sistemi multistrato e quindi utili per favorire il controllo delle prestazioni energetiche delle strutture. L'applicazione dei componenti *Unary Force* e *Pressure*, attraverso l'imposizione di specifiche condizioni di vincolo, genera principalmente superfici convesse, a curvatura gaussiana positiva, capaci di rispondere soprattutto alle sollecitazioni di compressione.⁴ (fig.9.6) Il principio delle membrane sottili appese e successivamente invertite è stato sviluppato con successo dal tecnico svizzero Heinz Isler nel 1950.⁵

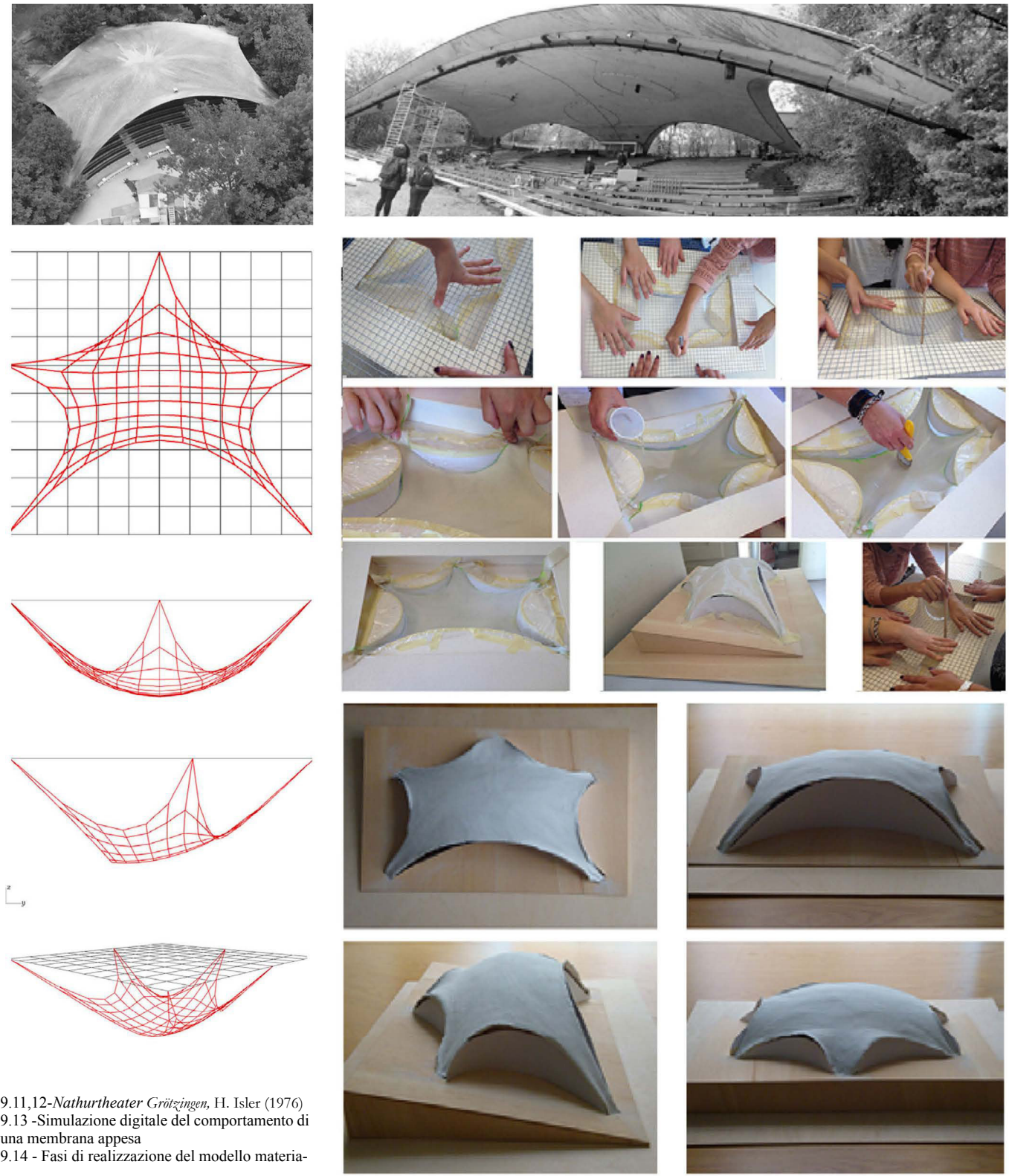
9.6 - Analisi della curvatura gaussiana della membrana "virtuale" invertita. La curvatura è prevalentemente positiva.



Il suo metodo consisteva nel immergere un telo, ancorato agli angoli e rilassato, in una miscela di acqua e gesso (fig.9.14). A contatto con l'aria, il sistema rilassato solidifica, e la "crosta" ricavata può, dunque, essere capovolta. Heinz Isler e Frei Otto eseguirono numerosi esperimenti mediante l'uso di tale tecnica (fig.9.9,10). Gli esperimenti eseguiti e schedati dimostrano che la forma ricavata dipende, a sua volta, dalla forma della membrana piana iniziale, cioè precedente alla fase di rilassamento, e dalla scelta della posizione dei punti di ancoraggio. In ambiente digitale, la simulazione dell'approccio è consentita dal componente/forza *Unary Force*, che permette il passaggio da una superficie NURBS piana ad un sistema discreto rilassato, fisicamente e strutturalmente simile alle reali condizioni di una reticolo materiale. Il *Naturtheater Grötzingen* (1976), progettato da Isler e Balz, rappresenta un interessante caso di membrana invertita approfondito allo scopo di riproporne l'approccio progettuale per favorire la genesi di forme complesse ottimizzate. La superficie piana di partenza, un rettangolo, viene trasformata in una *mesh*: è necessario stabilire il numero di curve iso-parametriche, u e v, che ne definiscono la suddivisione in entrambe le direzioni.

9.7,8 - Modello di membrana invertita
9.9 - F. Otto, Disegno di studio sulle membrane invertite.
9.10 - H. Isler, Disegni di studio sui gusci.





9.11,12-Nathurtheater Grötzingen, H. Isler (1976)
9.13 -Simulazione digitale del comportamento di una membrana appesa
9.14 - Fasi di realizzazione del modello materia-

La discretizzazione della superficie consente di simulare le fibre di una membrana reale realizzata in tessuto. La maglia iniziale è decomposta, grazie agli appositi componenti del *plug-in Weavebird (Grasshopper)*, in punti e curve.

Su tali punti, che rappresentano i vertici della *mesh*, è applicata una forza unitaria, *Unary Force*. Questa forza agisce secondo una direzione specifica, che è necessario indicare utilizzando dei vettori orientati.

La maglia piana appartiene al piano x-y: pertanto, il vettore che indica la forza peso sarà diretto secondo l'asse z e verso il basso.

La simulazione dell'azione della forza di gravità sui vari punti della mesh richiede la scelta di un certo numero di *anchor point*, necessari per evitare che la rete si stacchi dal supporto durante la simulazione. La trasformazione dei vari elementi discreti in “molle ideali” consente il controllo di una serie di parametri, tra cui la rigidità, *stiffness*, e la plasticità del sistema: è necessario impostare un valore di rigidità per impedire che la membrana si rilassi all'infinito. (fig.9.15)

Lasciando invariato il valore della forza peso agente e variando il valore della rigidezza delle molle o il numero di curve iso-parametriche, u e v, indicato per suddividere la mesh, è possibile osservare delle variazioni morfologiche durante la fase di rilassamento della membrana.

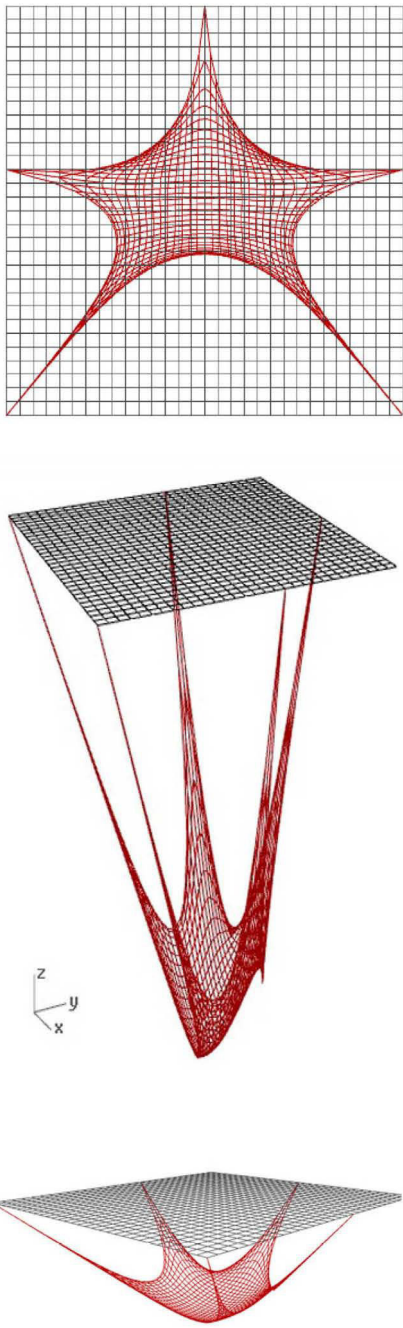
E' intuitivo che i valori indicati per la rigidità ed il grado di rilassamento del sistema sono inversamente proporzionali: spetta al progettista veicolare l'azione e controllare gli esiti che derivano dalla variazione di tali parametri.

Inoltre, aumentando il numero delle curve iso-parametriche, e lasciando inalterato il valore di rigidezza indicato, è possibile ottenere una maggiore deformazione, derivante dall'infittimento della mesh piana di origine. In tal caso, al fine di ridurre la deformazione del sistema sarà necessario aumentare il valore di *stiffness*.

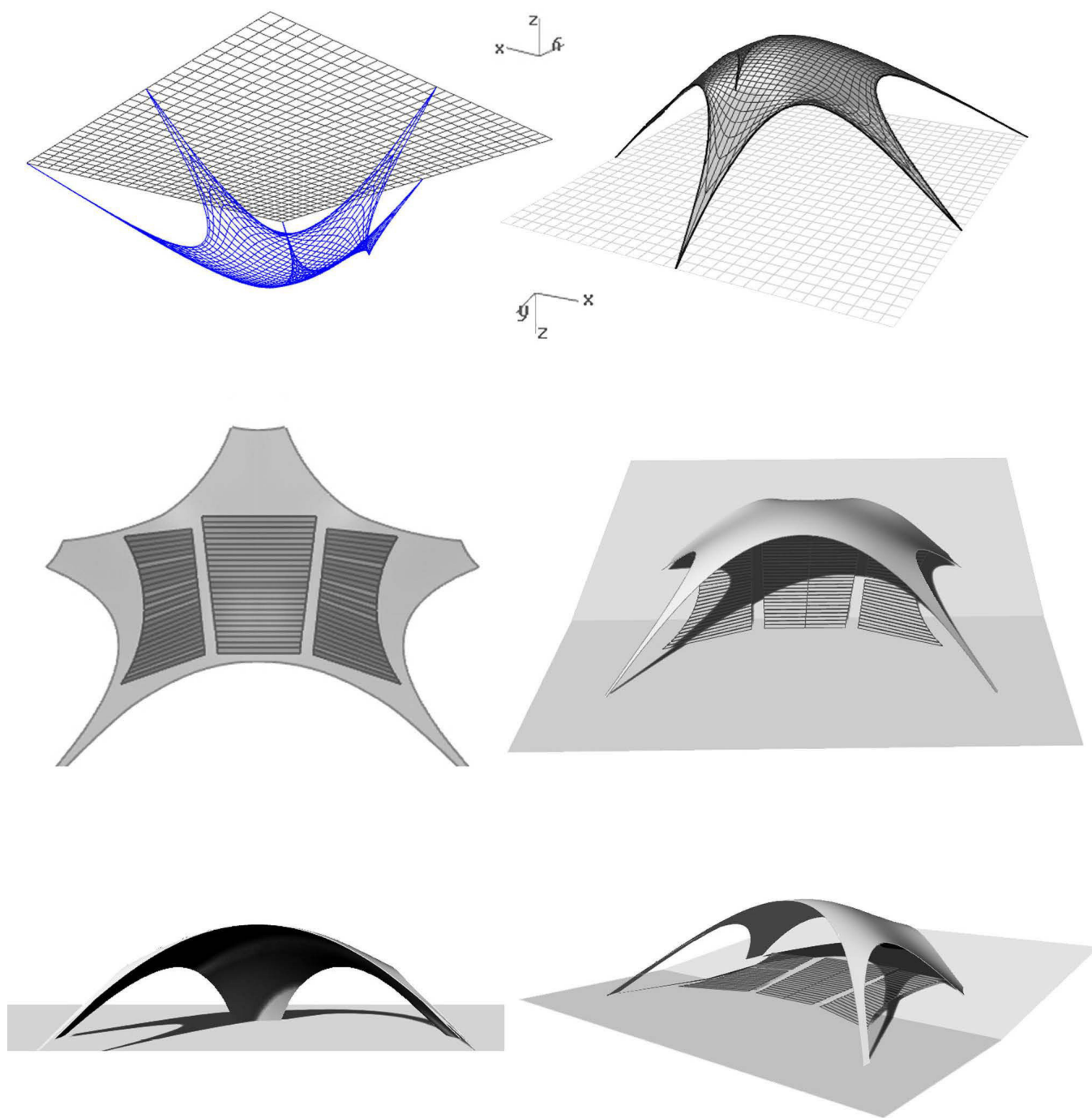
Infine, una volta terminata la simulazione, interpolando i punti che compongono la griglia rilassata con lo strumento patch, è stata realizzata una superficie NURBS.

Le figure seguenti mostrano il guscio ricavato sul modello del *Naturtheater Grötzingen* di Isler. (fig.9.16)

Questo approccio rappresenta un processo ricorsivo di ricerca formale, che si traduce in un metodo altamente creativo, ma allo stesso



le del Nathurtheater Grötzingen



9.15

tempo dipendente dalle proprietà dei materiali utilizzati e dal conseguente comportamento statico delle forme generate.

La scelta degli *anchor point* influisce in maniera sostanziale sulla natura formale della superficie, come dimostrato attraverso gli esperimenti eseguiti.

Sulla base della simulazione precedente, la prima prova è stata eseguita a partire da una superficie piana rettangolare, suddivisa in elementi triangolari e ancorata ai quattro vertici.

Il grafico della curvatura gaussiana mostra che la *patch* ricavata è prevalentemente di segno positivo.

A dimostrazione di quanto descritto, seguono le schede che mostrano i risultati di una serie di prove realizzate e confrontate allo scopo di fornire un metodo più spedito ed ottimizzato per la ricerca di forme prevalentemente a curvatura gaussiana positiva e quindi adatte per la tassellazione mediante elementi esagonali planari e convessi.

La stessa definizione è stata adottata anche per sperimentare l'azione del componente/forza *Pressure* (*Kangaroo*): la differenza tra i due processi risiede nella sostituzione, all'interno della definizione, del componente *Unary Force* (*Kangaroo*) con il suddetto componente.

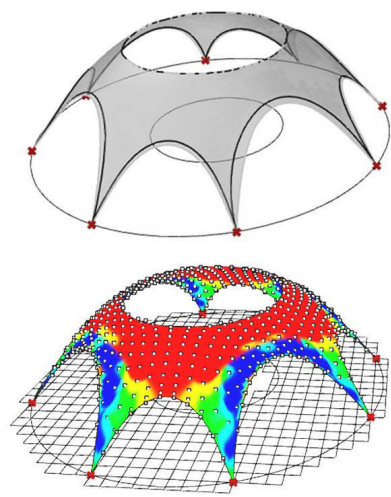
I punti, i segmenti di connessione e gli *anchor point* rappresentano i dati di input. Nei metodi di *digital form finding* il carattere parametrico dell'approccio deriva dal considerare anche il materiale come informazione e quindi come parametro variabile.⁶

Tuttavia, le simulazioni eseguite mirano ad indagare solo le conseguenze di natura formale derivanti dalla simulazione delle forze.

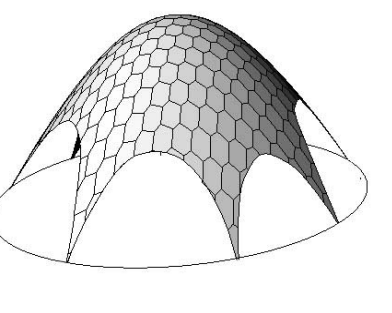
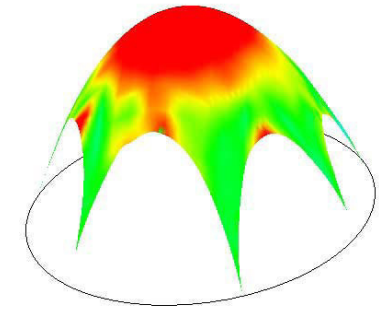
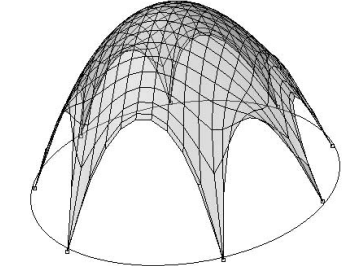
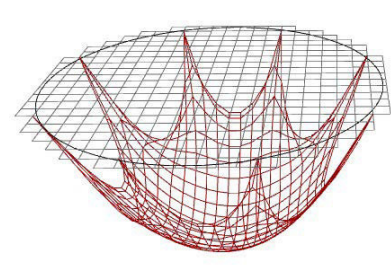
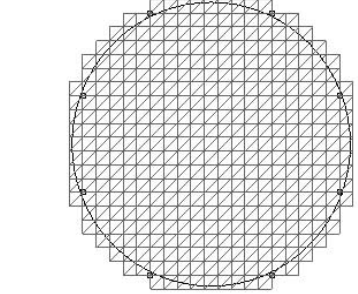
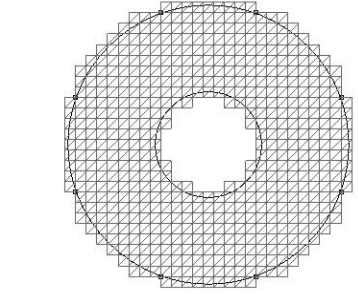
Nella prima scheda, *Pressure 1*, è possibile osservare che l'uso di una maglia triangolare causa una deformazione del sistema condizionata in corrispondenza dei due punti di ancoraggio nei quali convergono i lati di tre triangoli della *mesh*: le conseguenze formali sono chiaramente visibili dall'analisi della curvatura gaussiana della *patch* estratta, la quale mostra un'area centrale in corrispondenza della quale si verifica una netta variazione della curvatura.

Al contrario, la maglia quadrilatera, utilizzata per la seconda prova, (scheda *Pressure 2*) favorisce una deformazione più "omogenea" della rete, a cui corrisponde una distribuzione della curvatura gaussiana più uniforme e quasi totalmente positiva: le variazioni sono visibili solo in corrispondenza dei bordi della membrana.

Com'è visibile dall'osservazione di due dei casi appartenenti al campione (schede B1 e B2), i punti di ancoraggio possono anche essere



scelti tra i punti interni della *mesh*. Una volta generata la superficie, è possibile procedere con il *paneling*. Per agevolare la planarizzazione delle celle esagonali sghembe distribuite sulla superficie⁷ si procede alla sottrazione delle aree che presentano una variazione di curvatura: tale operazione non incide sulla morfologia generale della forma originaria (fig. 9.17,18). La planarità degli esagoni viene verificata mediante l'analisi della curvatura di ciascuno degli elementi, la quale conferma che il perimetro poligonale della cella è planare. Per verificare la validità di questa tecnica è stata sperimentata la stessa procedura su griglie piane, continue o forate, di diversa forma (vedi schede allegate al paragrafo): quadrilatera, triangolare, circolare (poligonale regolare) e poligonale irregolare. Nel caso di una figura piana dal profilo curvo (schede *Unary Force*) per ottenere la *mesh* da deformare il software procede approssimando l'area della superficie con una griglia modulare (fig.9.19,20). Il processo richiama il metodo di esaurimento, noto procedimento matematico per il calcolo delle aree delle figure geometriche piane. Tale metodo consiste nella costruzione di una successione di poligoni che convergono alla figura data. Riflettere sulla forma della griglia piana da cui estrarre la griglia da deformare rappresenta uno stimolo interessante allo scopo di sperimentare numerose soluzioni formali. In conclusione, la lettura critica dei risultati derivanti dalle prove effettuate favorisce la ricerca mirata e consapevole di forme ottimizzate.



9.16
9.17,18 - Sottrazione delle aree con variazione della curvatura.
9.19,20 - Discretizzazione di superfici piane circolari
9.21a,b,c,d - La sequenza mostra le fasi di trasformazione della membrana rilassata in guscio discretizzato.
9.22 - *Panel fitting*. Elenco dei pannelli.
9.23 - Analisi della curvatura del modello realizzato per le facciate degli *Eiffel Pavilions*.
9.24a,b - Sovrapposibilità tra superfici aventi ugua-

9.2.2 Membrane, catenarie e superfici a curvatura negativa/nulla


Le ricerche e le analisi fino ad ora condotte stimolano la curiosità di comprendere come le differenti tipologie di pannelli curvi fino ad ora sperimentati dai *geometry experts* per il *Panel Fitting* si distribuiscano su una superficie complessa e che grado di approssimazione formale della superficie di partenza siano in grado di generare.






La curvatura gaussiana delle superfici rigate è sempre negativa o nulla: quindi, come dimostrato attraverso i casi indagati e come dedotto dalle ricerche pubblicate in merito, l'uso di strisce sviluppabili è particolarmente idoneo per approssimare le superfici a curvatura gaussiana negativa.⁸ Inoltre, è dimostrato che le *Conical Mesh* e le *Circular Mesh*, particolarmente vantaggiose per le proprietà descritte, derivino dalla razionalizzazione di superfici a curvatura Gaussiana negativa.(cfr. cap VI, par. 6.4)

Pertanto, le riflessioni sulla maggiore o minore sovrapposibilità tra superfici aventi curvatura dello stesso segno hanno ispirato la ricerca di sistemi capaci di generare delle forme a curvatura gaussiana prevalentemente negativa o nulla, dunque idonee per favorire la distribuzione di pannelli a singola curvatura o a doppia curvatura, ma rigati. Per ricavare tali superfici sono stati utilizzati i componenti *Unary Force* e *Catenary*. Analogamente alle condizioni di vincolo imposte per modellare la forma delle facciate degli *Eiffel Pavilions* (cfr. cap. VII), per finalizzare l'applicazione delle tecniche di *digital form finding* alla ricerca di superfici a curvatura nulla o negativa, gli *anchor points* del sistema piano discreto sono stati collocati lungo l'intero bordo della griglia. (scheda *Unary Force* 5)



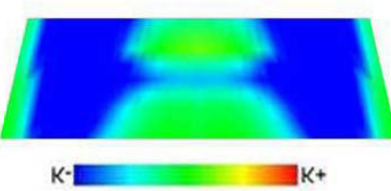
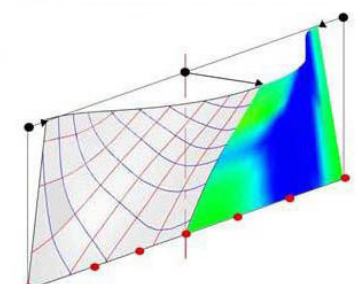
In particolare, il componente *Catenary* (*Grasshopper*), creato da Giulio Piacentino nel 2010, si è dimostrato particolarmente utile per la genesi di tali superfici. Tale componente contiene al suo interno l'equazione della curva catenaria.⁹

La catenaria è la forma che un cavo o una catena ancorata agli estremi a due supporti assume sotto il proprio peso.¹⁰ Gaudì è stato uno dei primi ad utilizzare tale sistema per progettare strutture complesse. Analogamente alle membrane appese, la catenaria è una configurazione che, se invertita, resiste soprattutto agli sforzi di compressione e per questo motivo ritorna utile per generare molteplici soluzioni





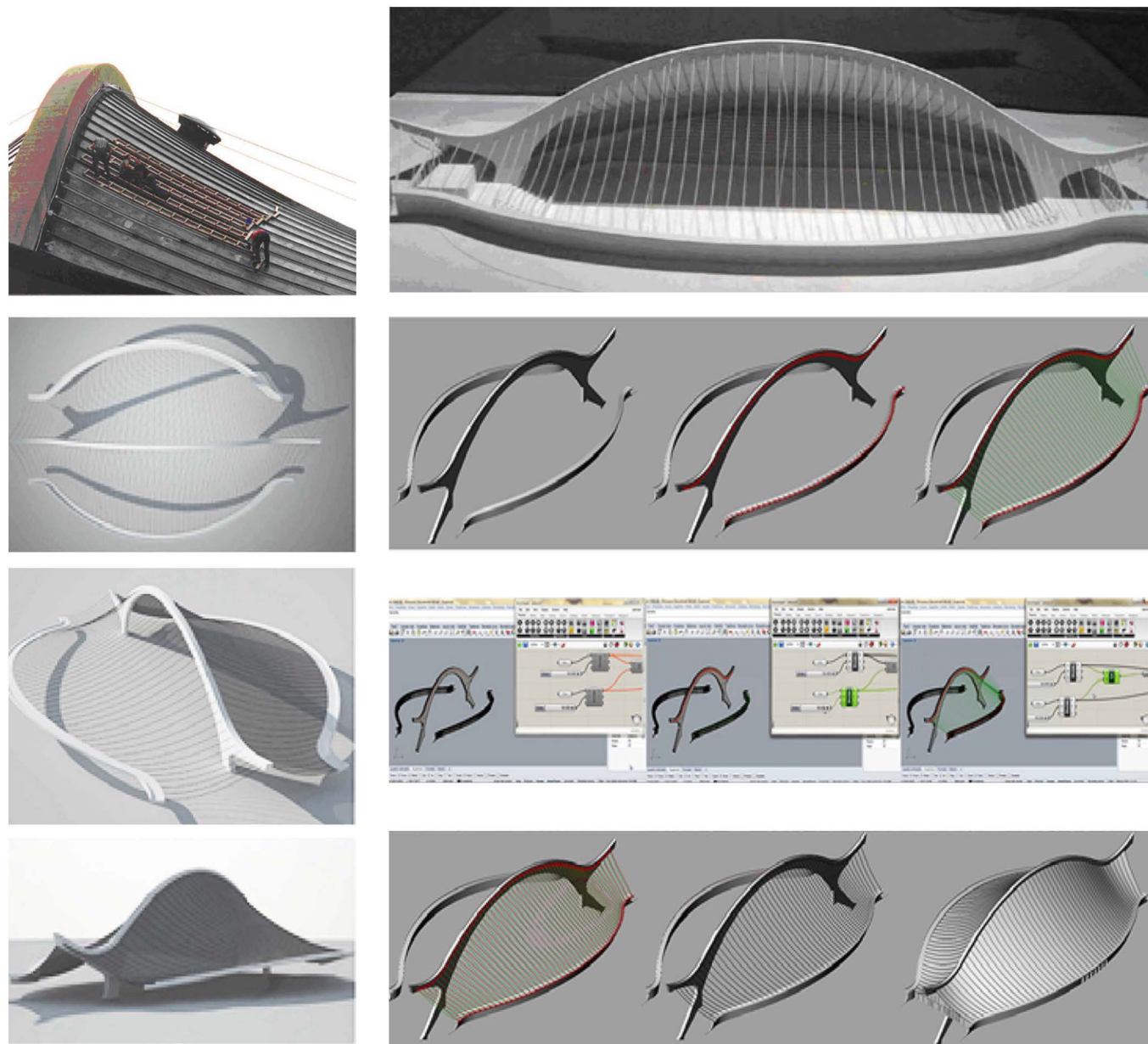
GEOMETRIA STAMPI
piani
cilindri
paraboloidi
tori
customizzati



le o diversa curvatura.
9.25 - H. Saarinen, *David S. Ingalls Hockey Rink*. 1958
9.26 - Modello materiale del *David S. Ingalls Hockey Rink*.
9.27 - Modello digitale del *David S. Ingalls Hockey Rink*.
9.28 - Sequenza delle fasi per la genesi del sistema di catenarie (*Grasshopper - Rhino*).

architettoniche, tra cui padiglioni o sistemi di copertura. Seguono una serie di immagini relative alla costruzione del modellio materiale e digitale della copertura del *David S. Ingalls Hockey Rink* (1958), progettato da Eero Saarinen (figg.9.27-28)

Il componente *Catenary*, per simulare il principio di base del comportamento fisico di una catenaria, richiede, quali dati di input, l'identificazione dei due punti estremi necessari per l'ancoraggio, l'indicazione



della lunghezza dell'elemento lineare da "appendere" e l'indicazione della direzione (lungo l'asse z), del vettore rappresentante la forza di gravità: l'output è infine rappresentato dalla curva catenaria.

Sul piano x-y sono state tracciate delle curve, successivamente suddivise in punti. E' necessario unire tali punti, i quali coincidono con gli anchor point del sistema, con delle curve, che inserite all'interno del componente vengono trasformate in catenarie. Variando la lunghezza di tali curve (catene) o il valore della forza e gestendo opportunamente il "rilassamento" degli archi catenari, è possibile ricavare diverse configurazioni.¹¹ Le curve "appese" rappresentano le sezioni consecutive necessarie per generare una superficie loft, successivamente invertita allo scopo di ottenere la configurazione architettonica finale e strutturalmente ottimizzata.

Lo strumento *Analisi curvatura* mostra che le superfici generate sono a curvatura prevalentemente negativa o nulla (scheda *Catenary*).

Alla luce delle indagini effettuate nei capitoli precedenti è noto che le superfici a curvatura prevalentemente negativa o nulla sono particolarmente idonee per l'applicazione delle tecniche di *paneling* che prevedono la distribuzione di pannelli a singola curvatura e per la computazione di sistemi discreti particolarmente vantaggiosi dal punto di vista geometrico costruttivo, quali le *Circular mesh* e le *Conical mesh* (cfr. cap. VI).

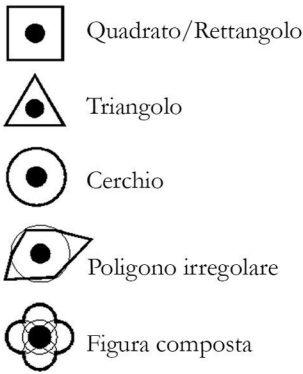
Ciò dimostra che l'ottimizzazione del processo di realizzazione di una forma complessa ha origine già in fase morfologico-progettuale: pertanto, sperimentare le tecniche di modellazione e di *form finding* ad oggi resi disponibili dagli appositi *digital tools* consente di ricercare in maniera consapevole e mirata le condizioni morfologiche ritenute più idonee per il raggiungimento di un risultato fattibile e, al tempo stesso, sostenibile.

Un possibile approfondimento è sicuramente quello di sperimentare il *Panel Fitting* di pannelli curvi (cilindri, paraboloidi, tori, *DStrips*) sulle tipologie di superfici generate attraverso tali tecniche, allo scopo di osservarne i risultati.

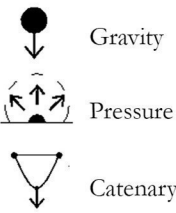
LEGENDA



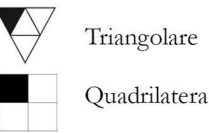
Geometria di base



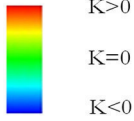
Genesi della superficie



Mesh pattern



Analisi Curvatura Gaussiana (K)

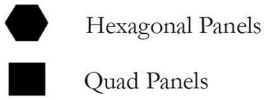


K>0

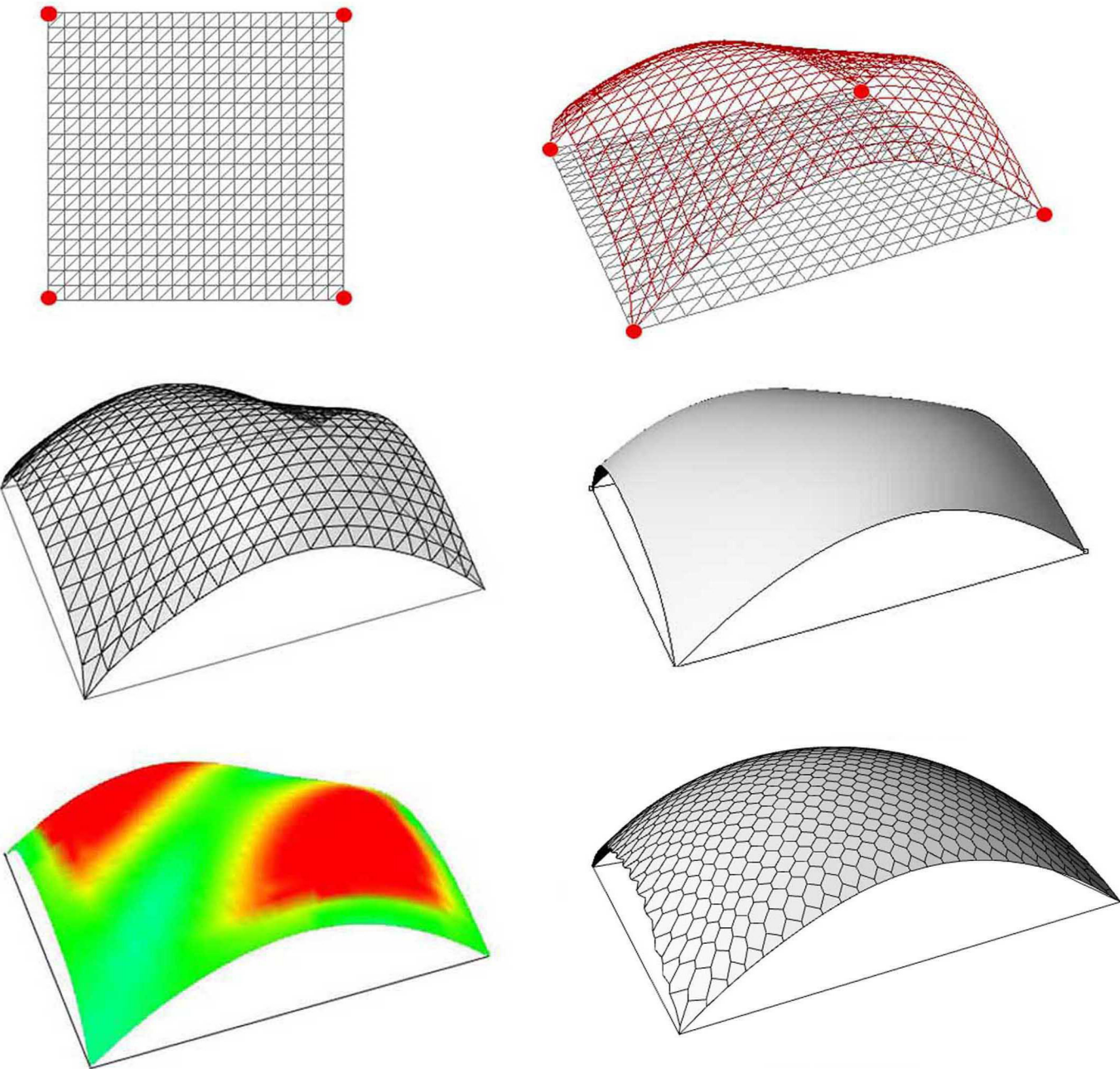
K=0

K<0

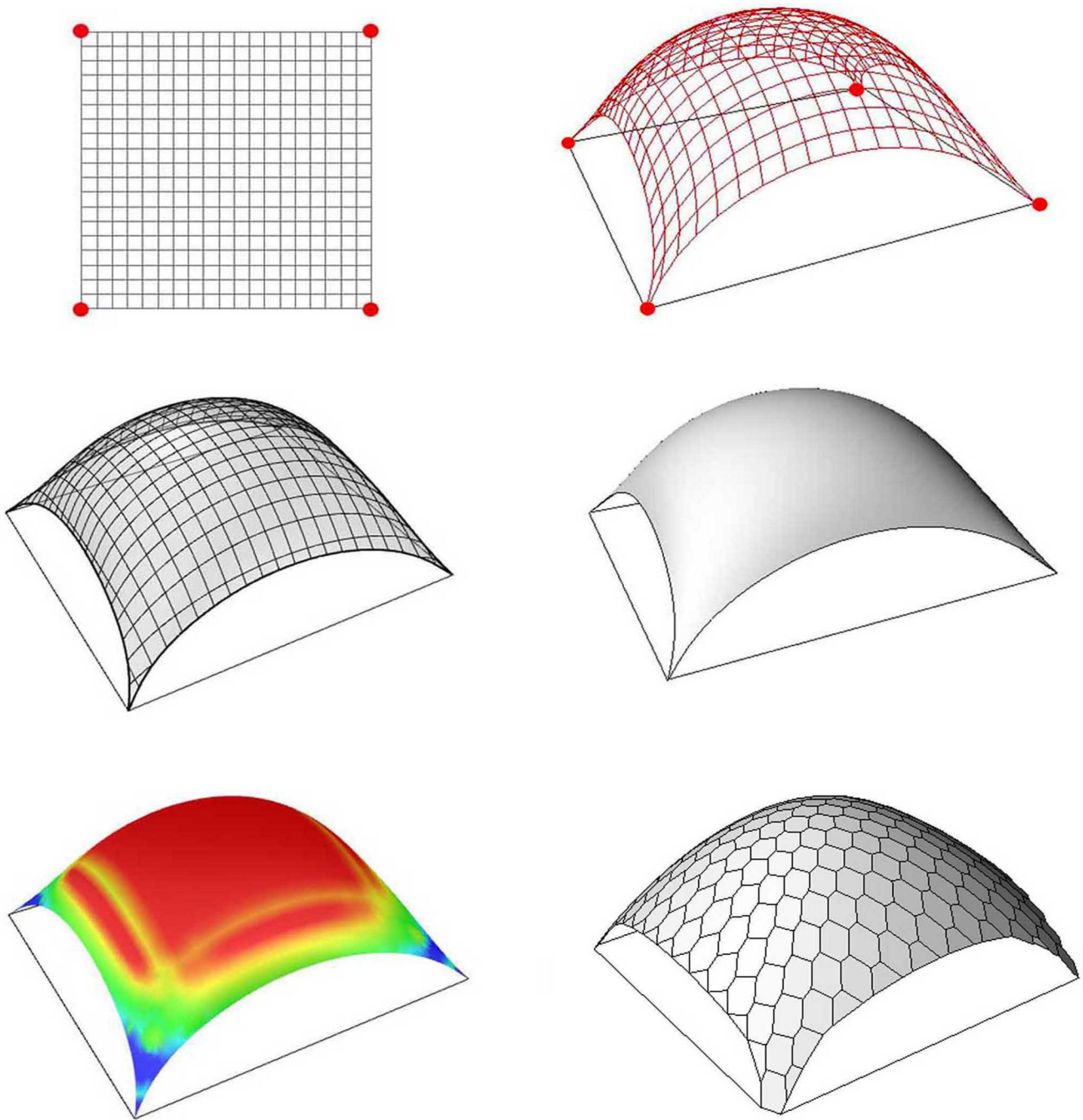
Planarizzazione

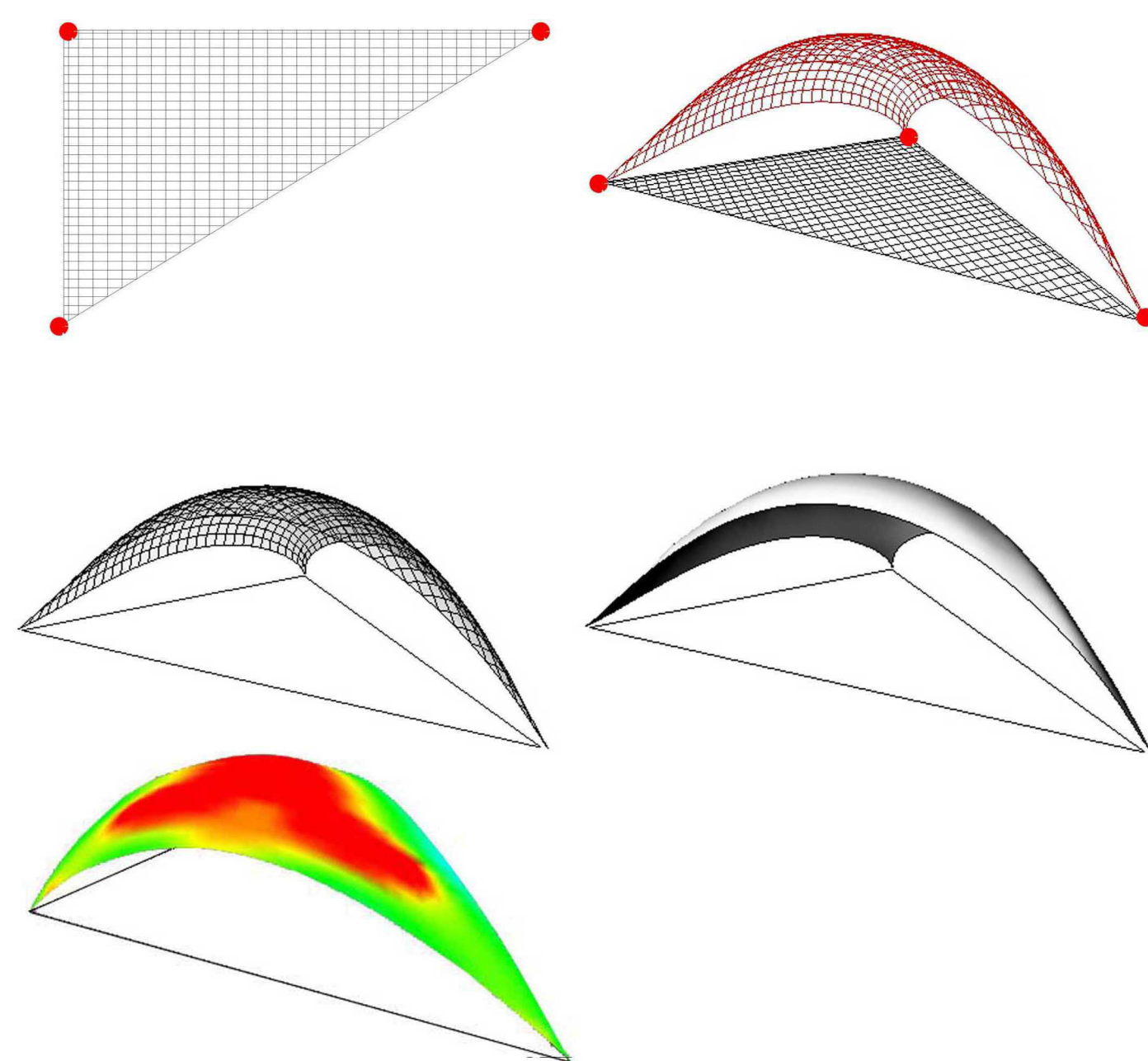
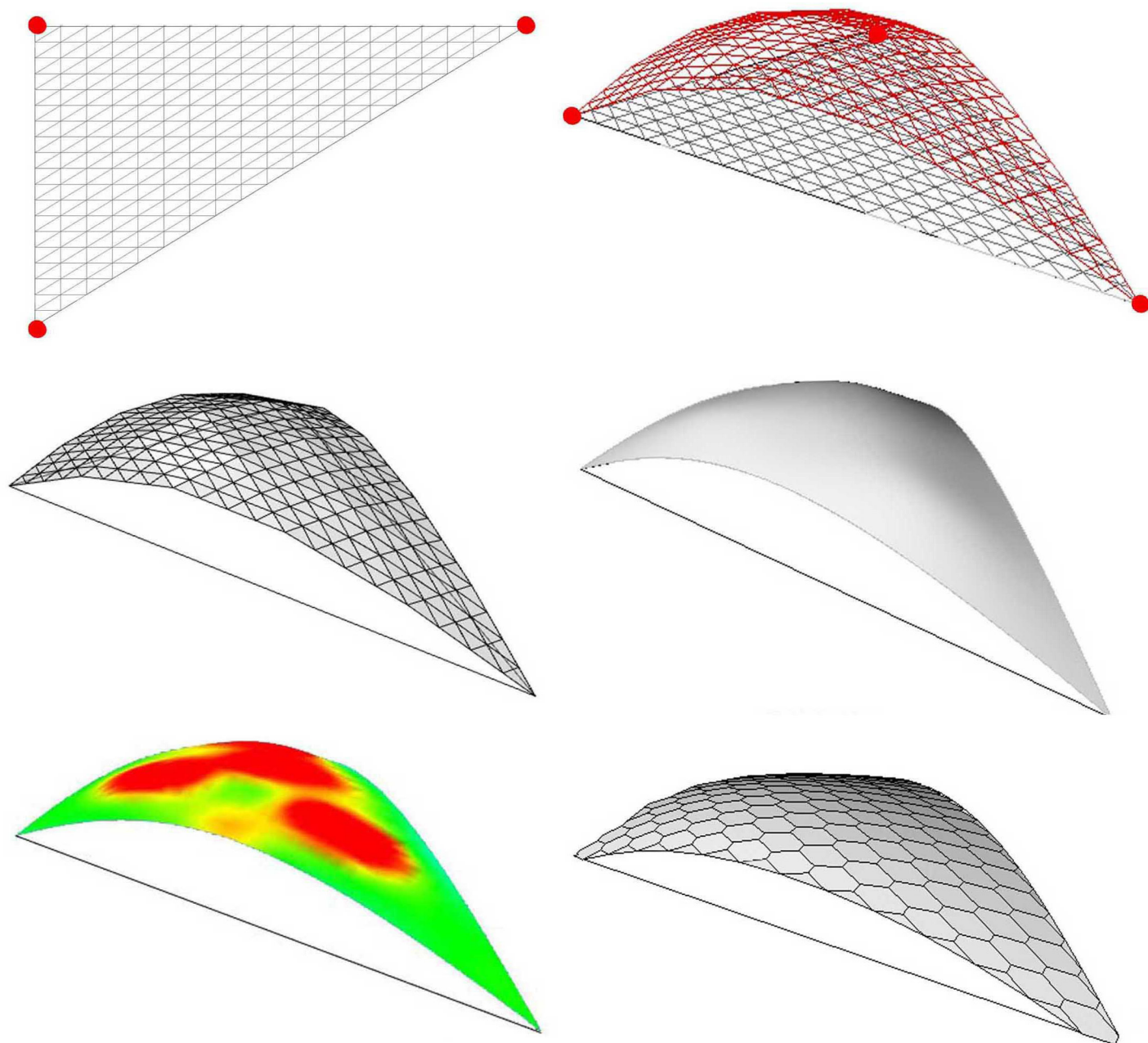


PRESSURE 1

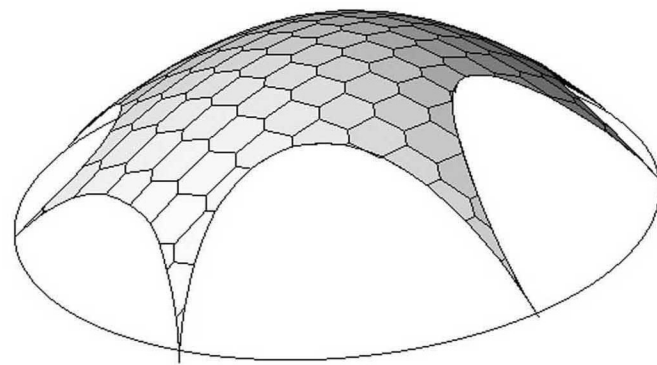
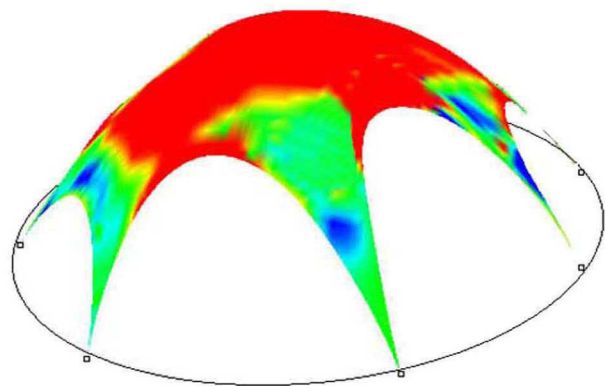
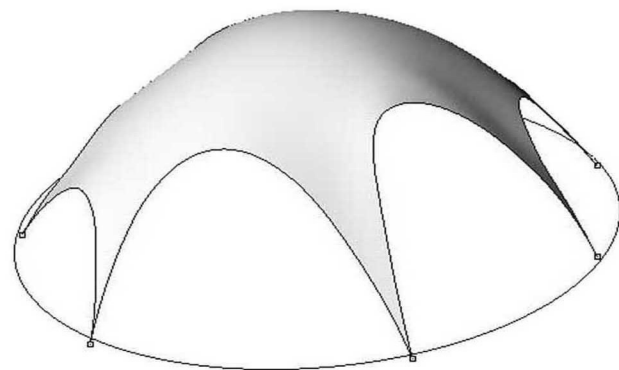
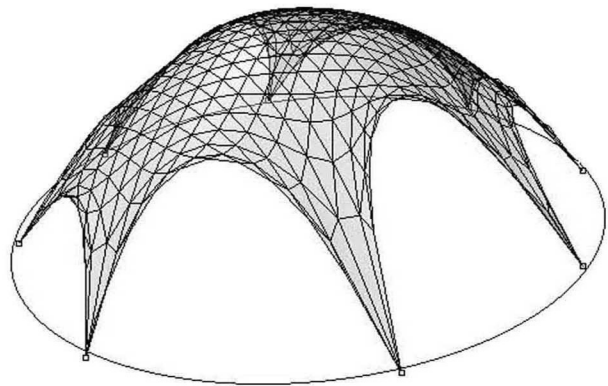
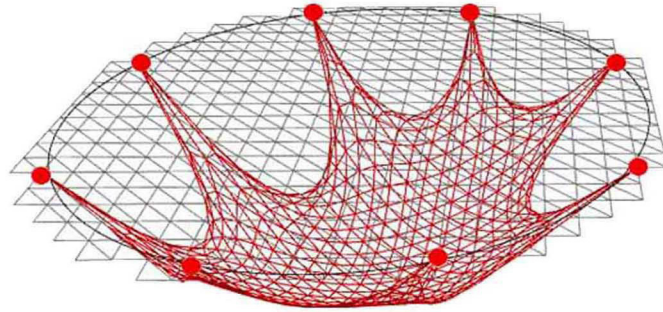
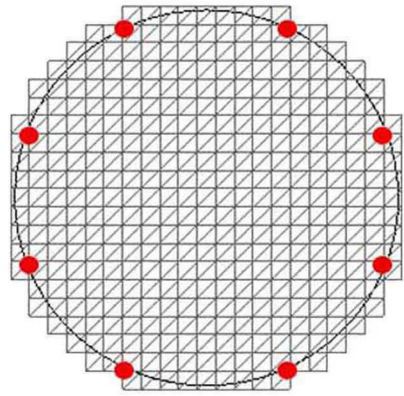


PRESSURE 2

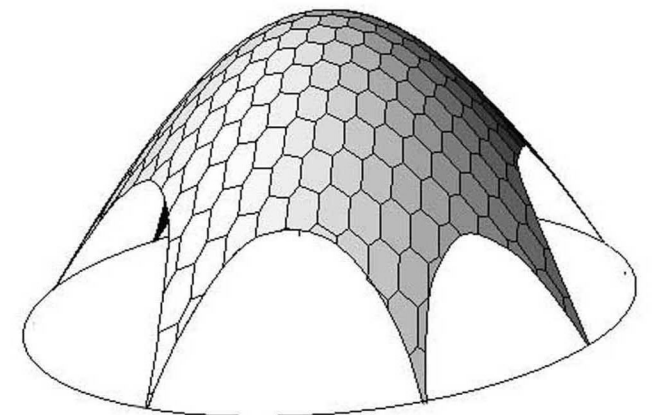
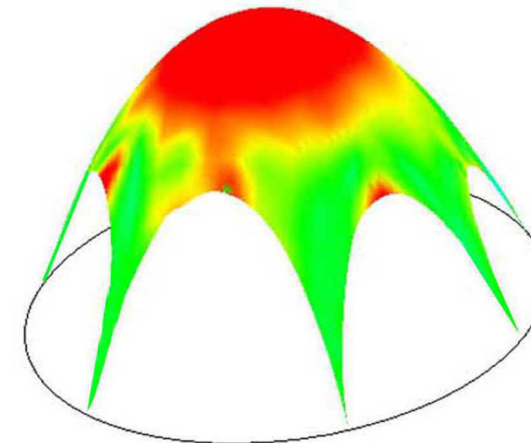
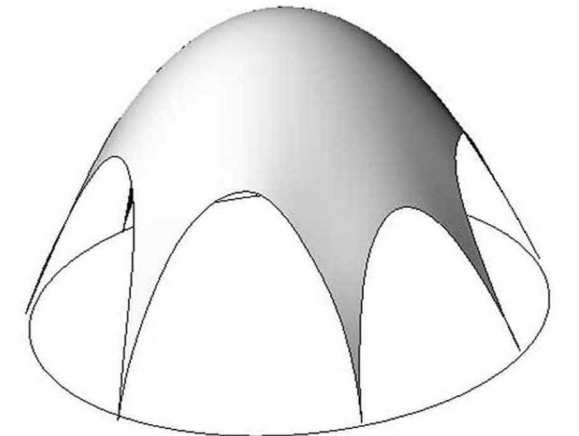
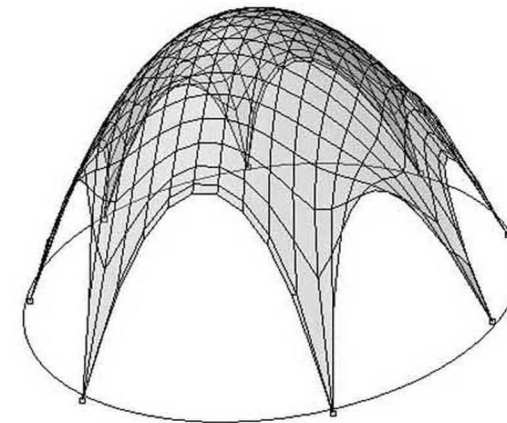
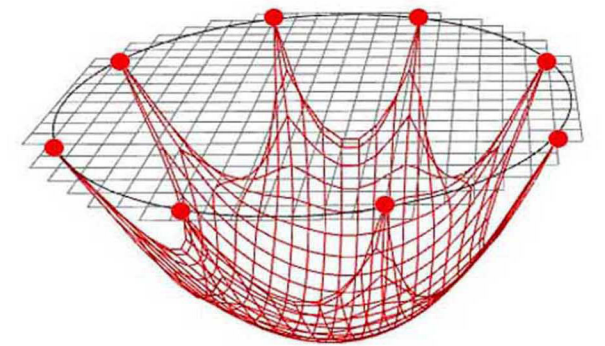
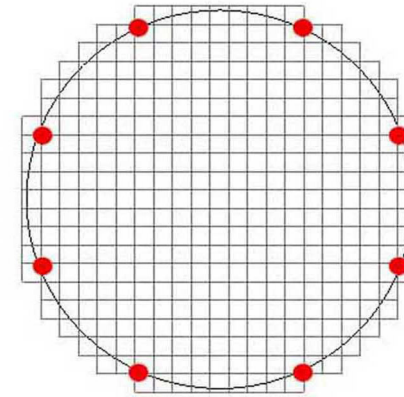
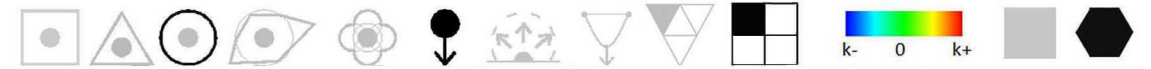




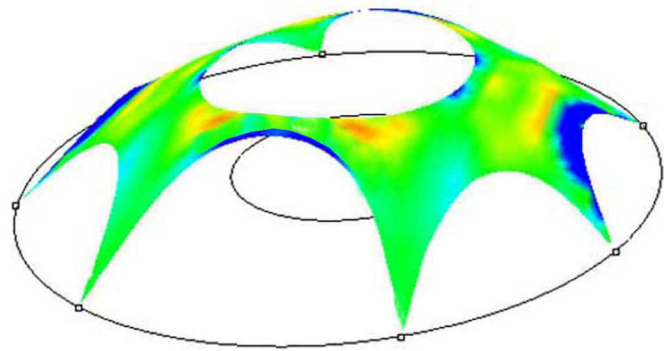
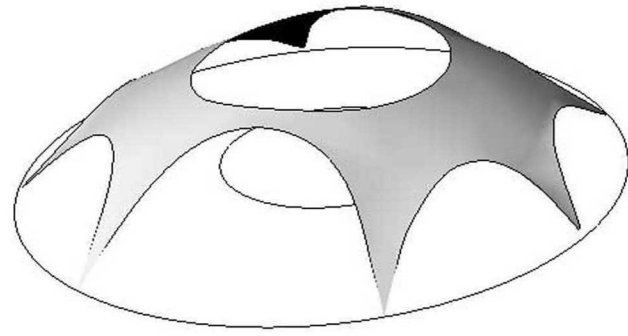
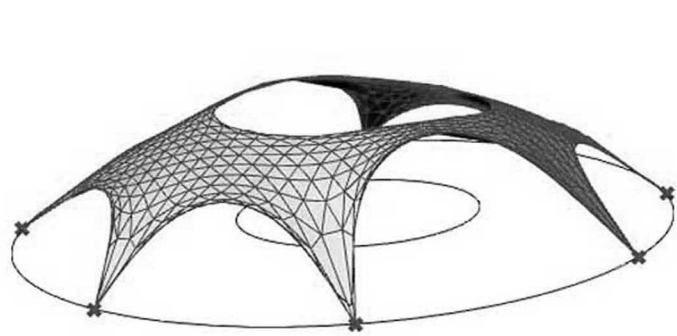
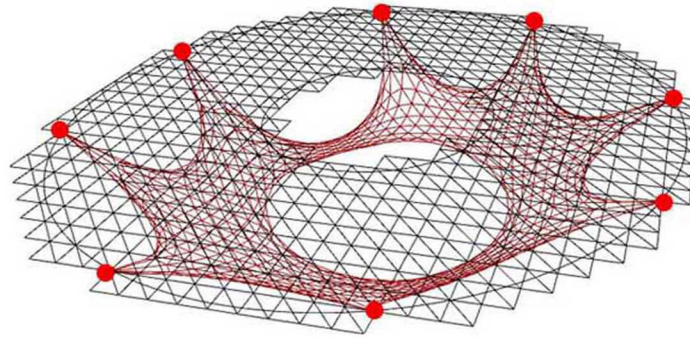
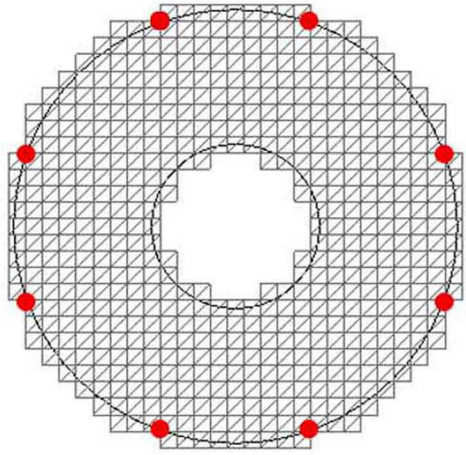
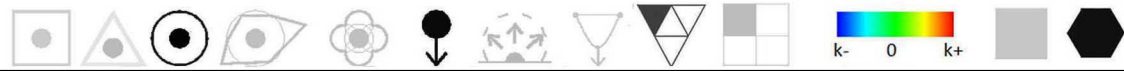
UNARY FORCE 1



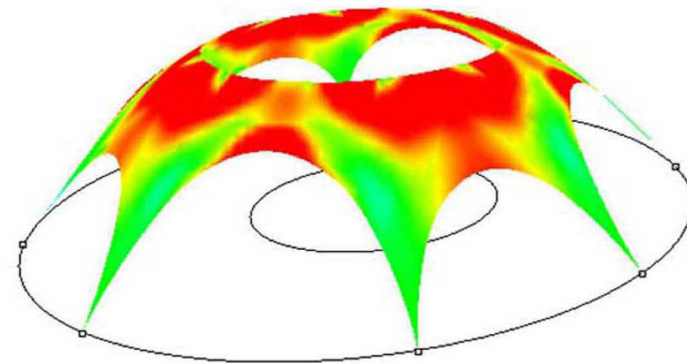
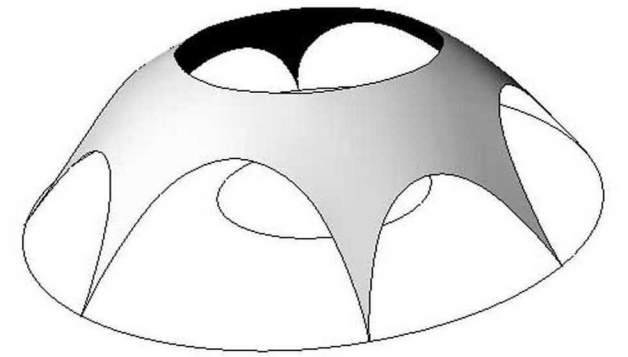
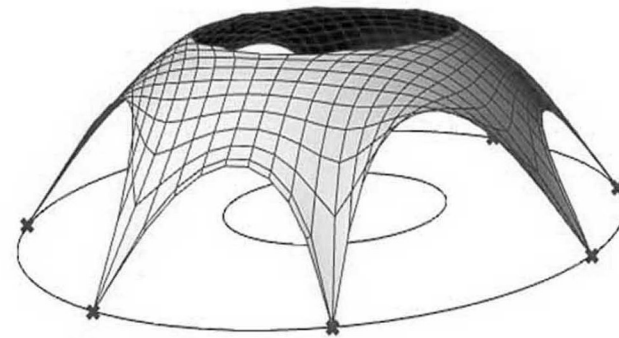
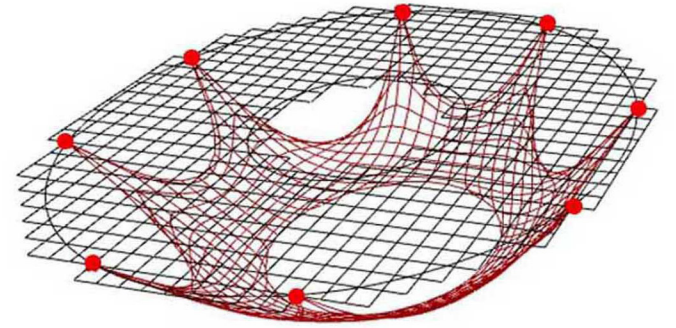
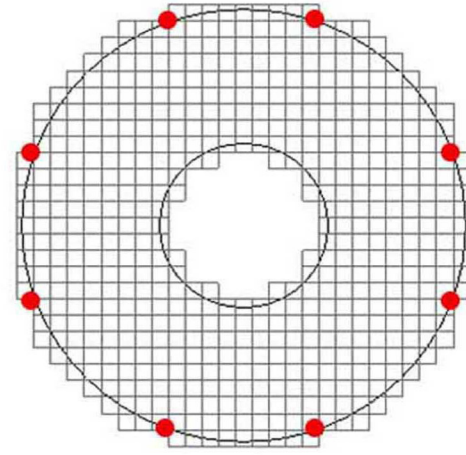
UNARY FORCE 2



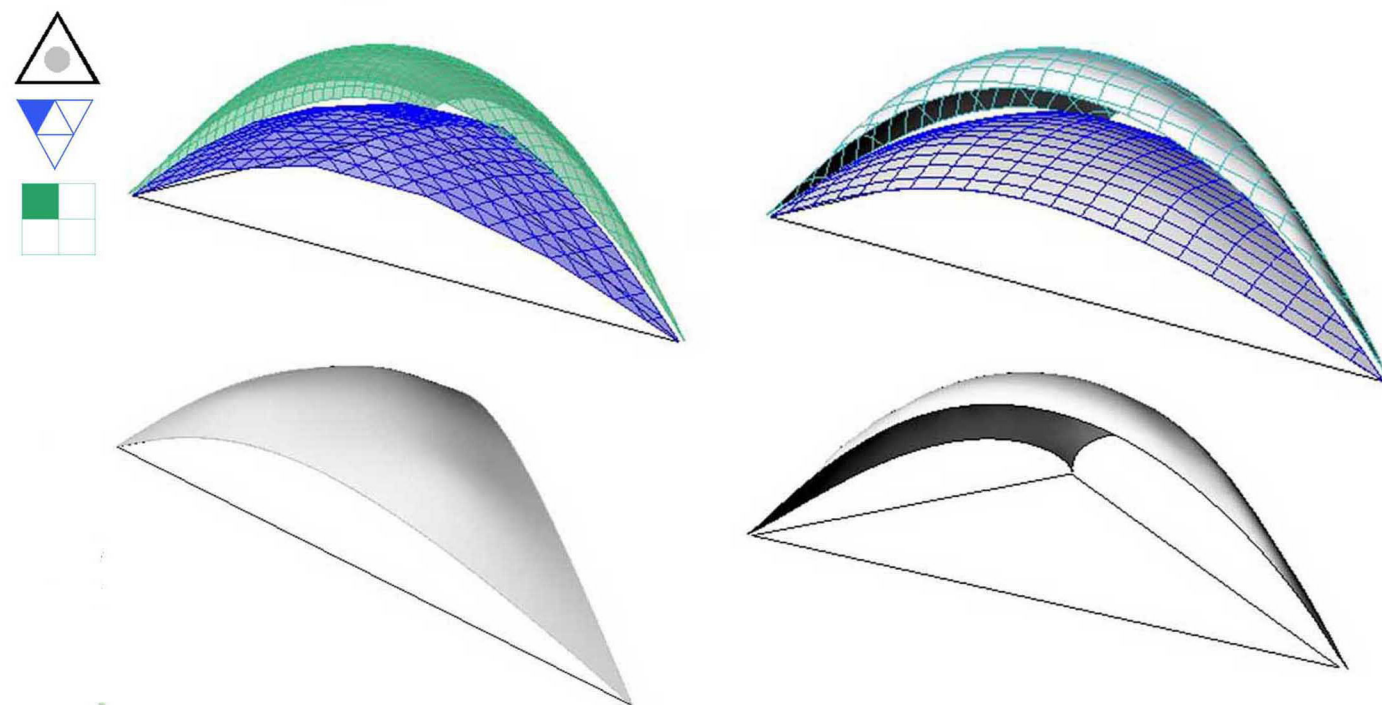
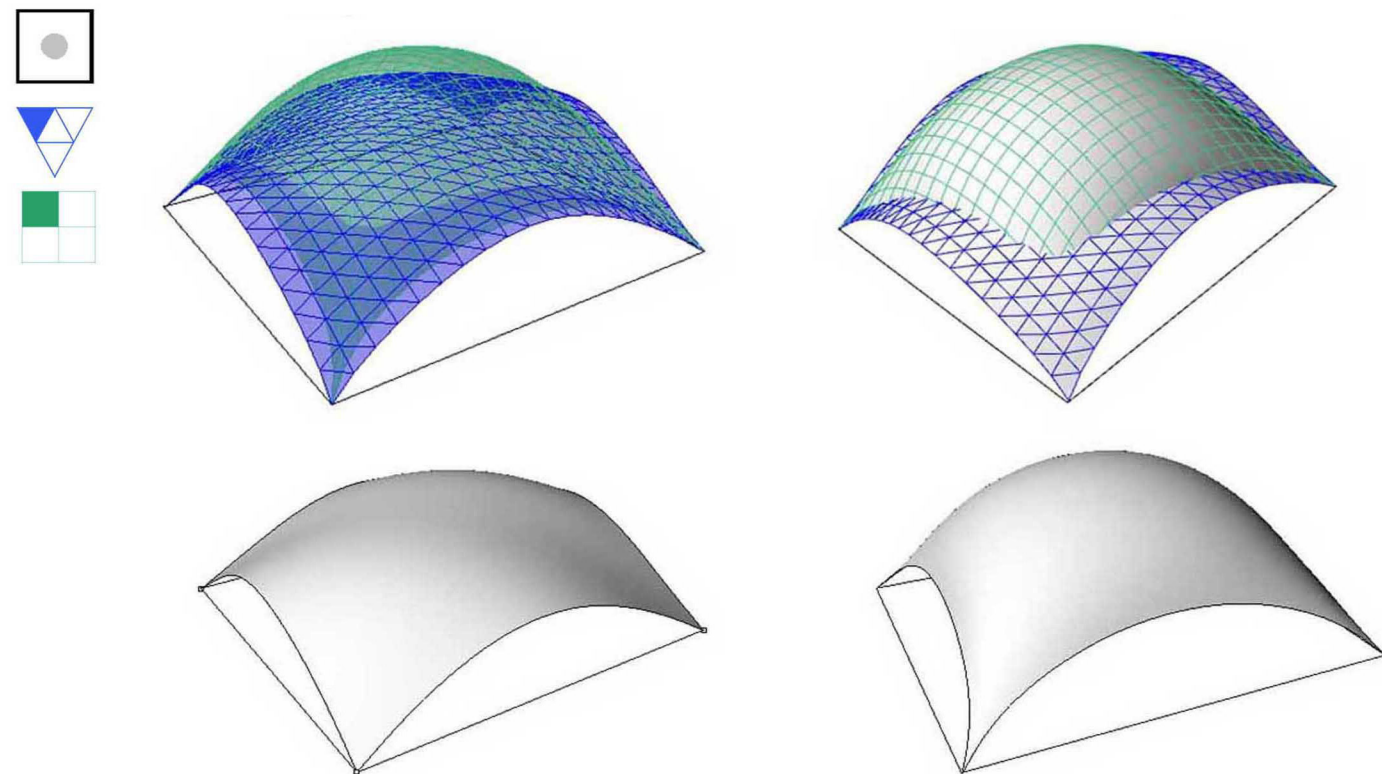
UNARY FORCE 3



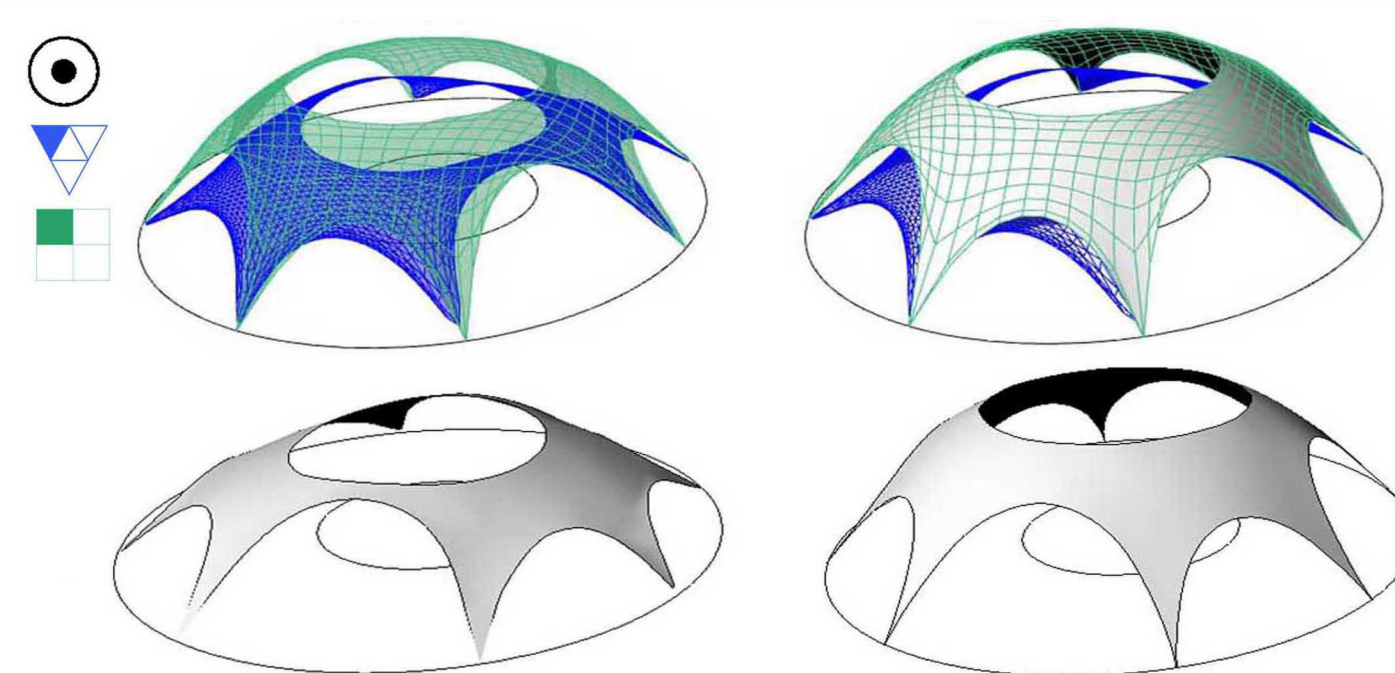
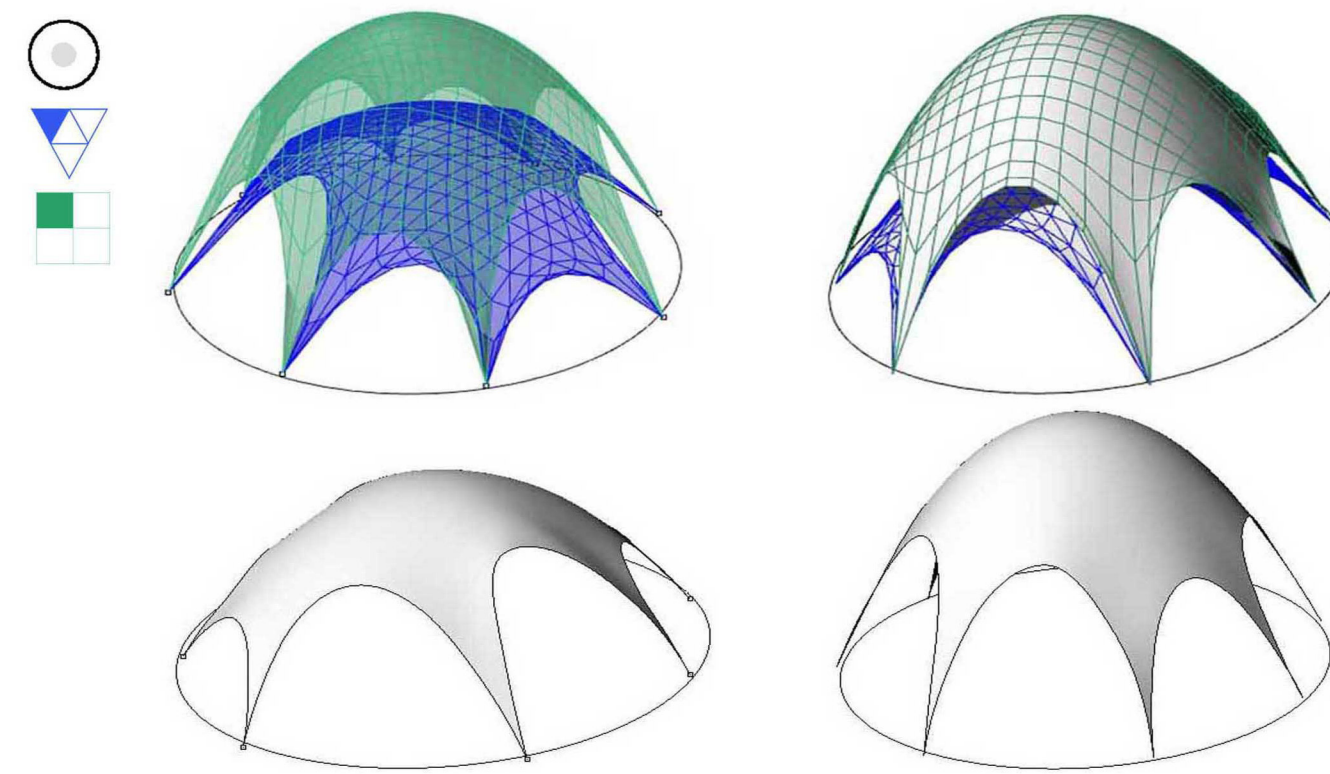
UNARY FORCE 4



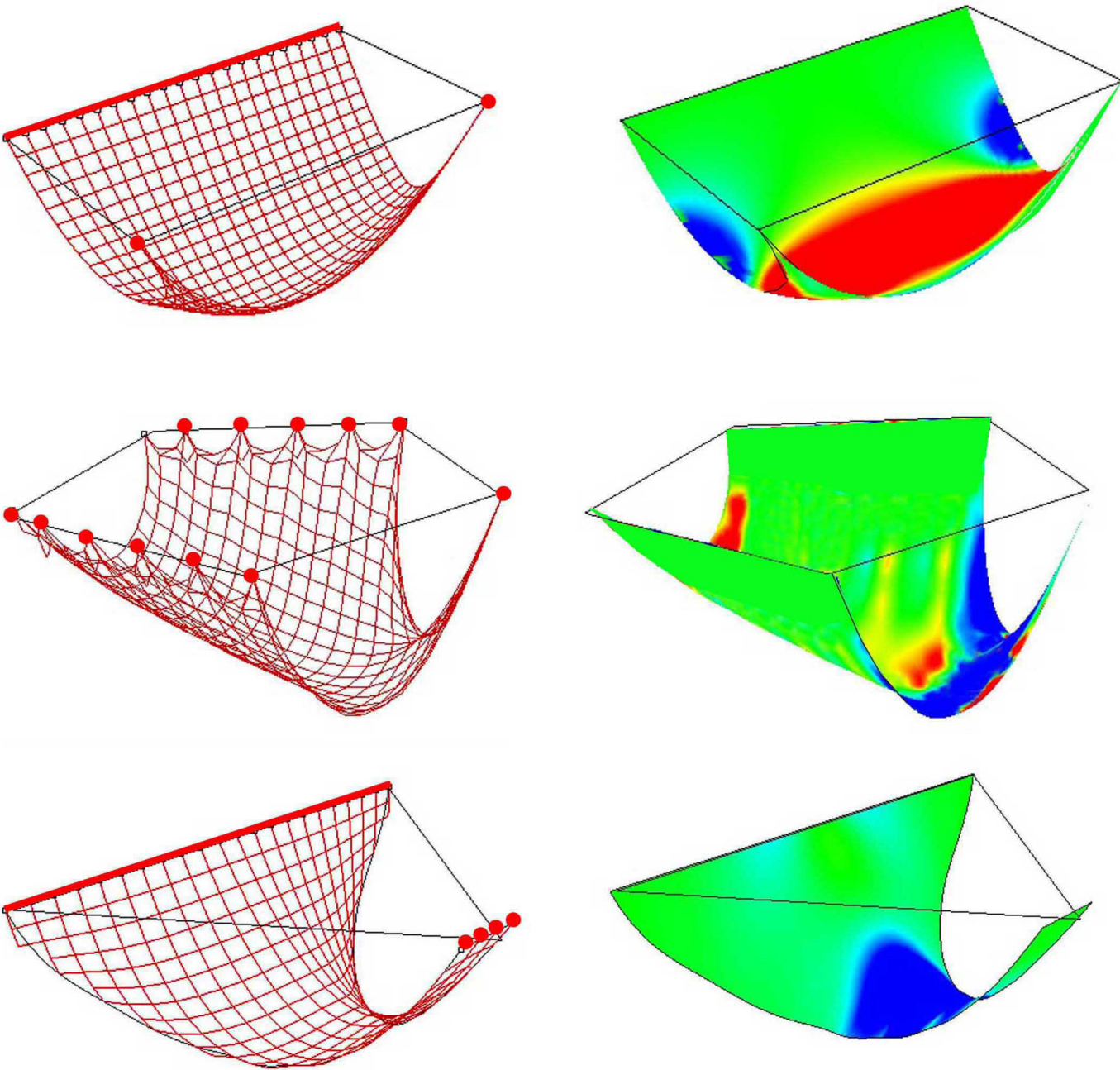
CONFRONTI: MESH TRIANGOLARE vs MESH QUADRILATERA



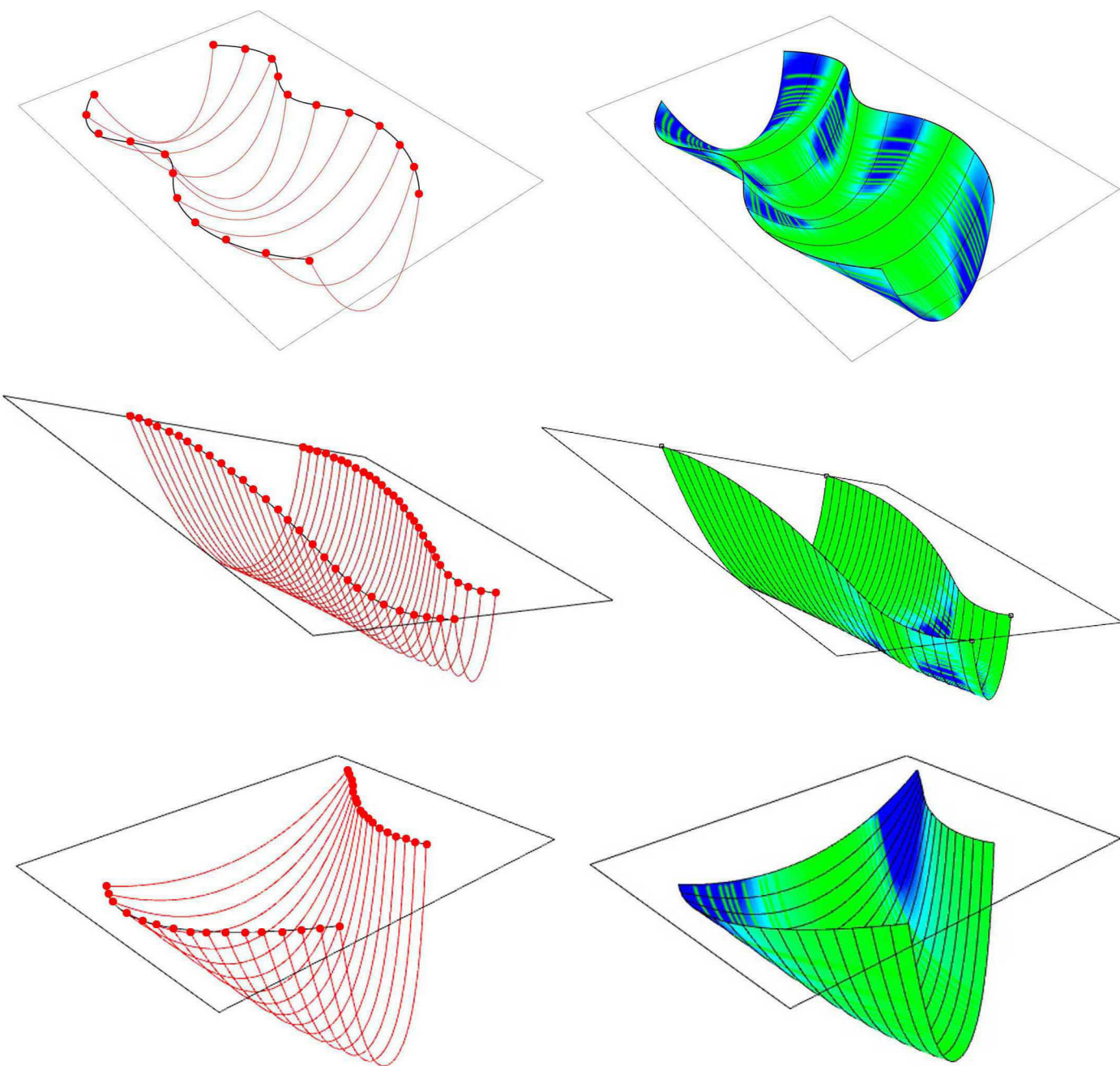
CONFRONTI: MESH TRIANGOLARE vs MESH QUADRILATERA



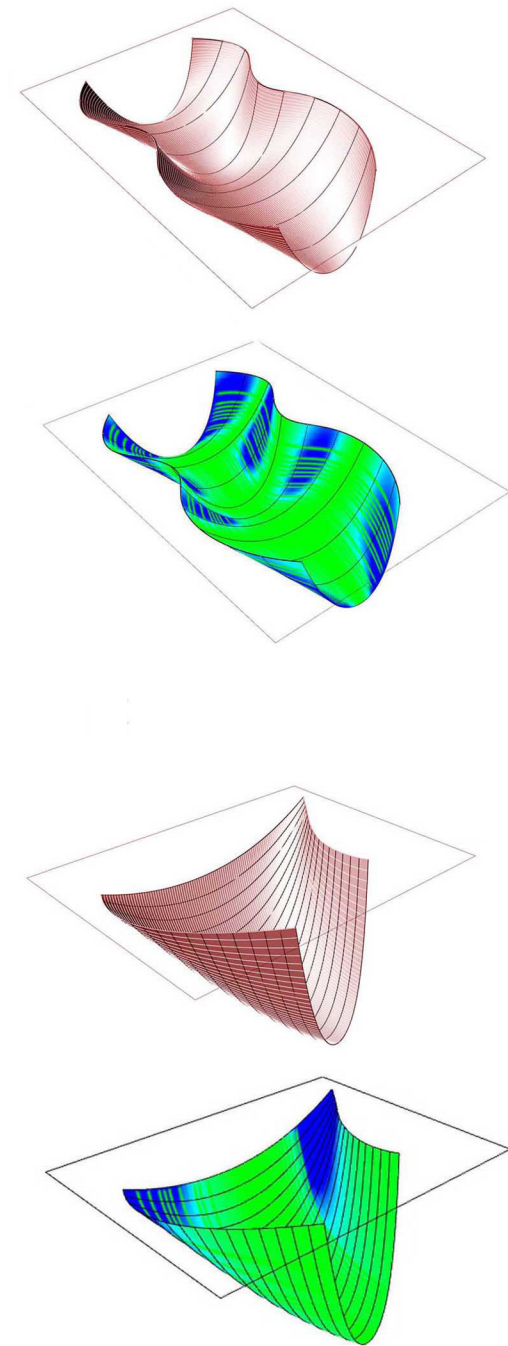
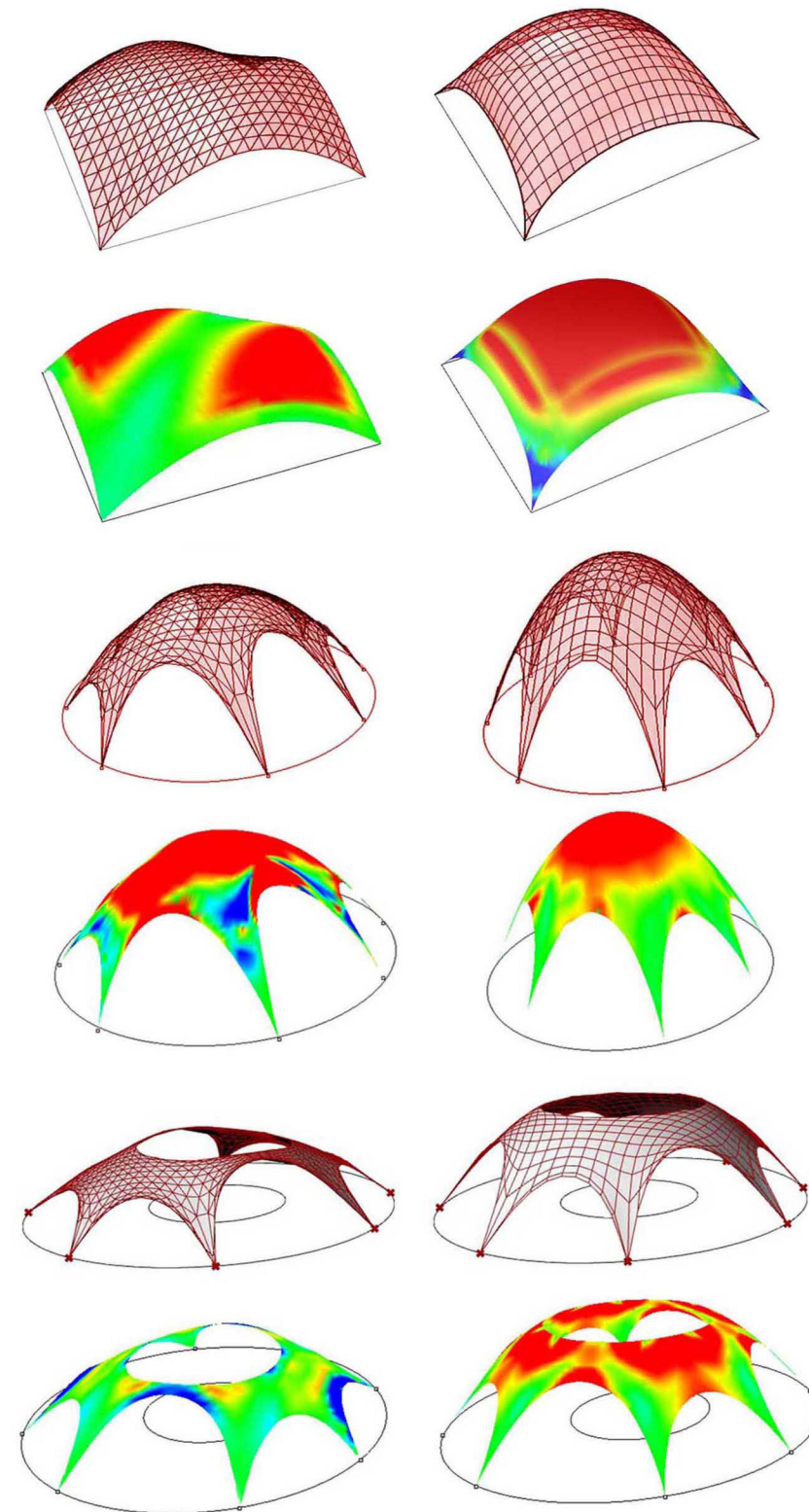
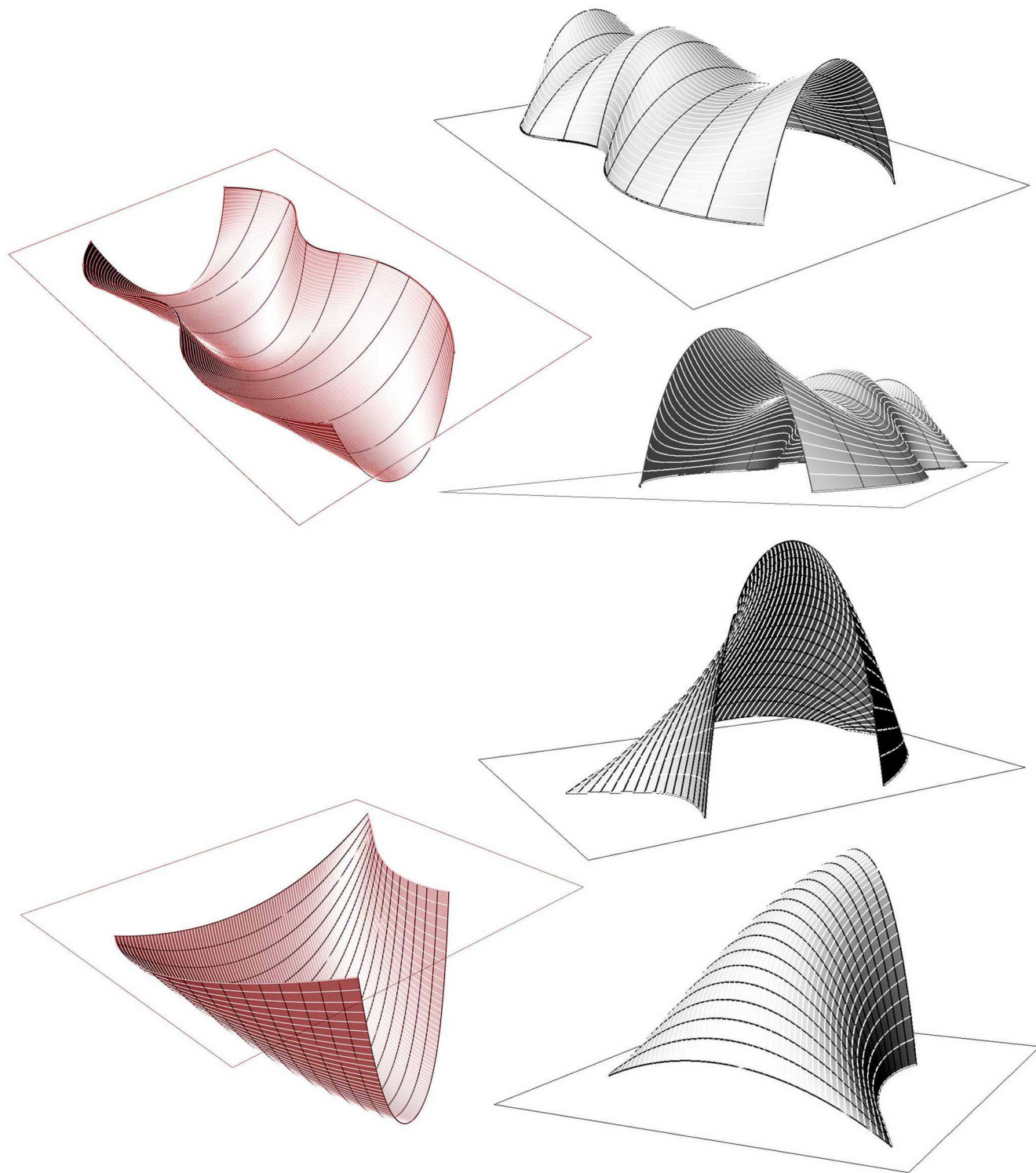
UNARY FORCE 5



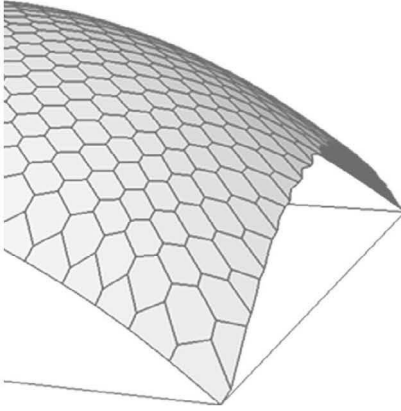
CATENARY 1



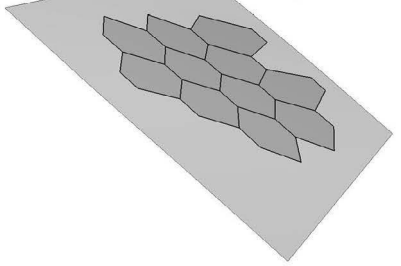
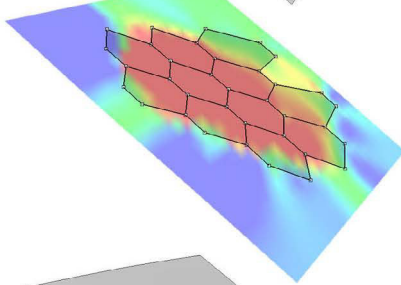
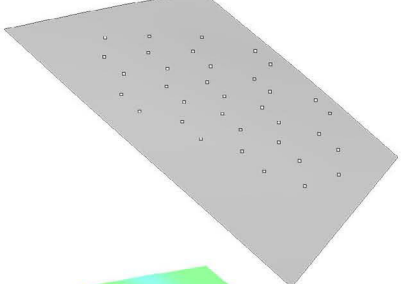
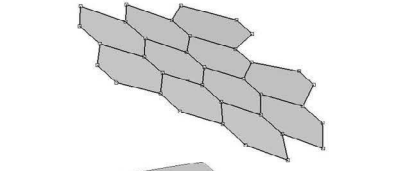
CONFRONTI



9.3 Offset mesh: verso un approccio stereotomico



9.29



9.30

La possibilità di eseguire l'offset di sistemi discreti composti da elementi piani esagonali e quadrilateri può essere sfruttata per trasformare un sistema di facce piane in un insieme di "elementi volumetrici" adiacenti.

Le facce di tali elementi possono essere piane o curve, in quanto è comunque possibile eseguire l'offset di una superficie curva e della rete di elementi poligonali curvi su di essa distribuiti dagli strumenti di paneling disponibili. In un'ottica di ottimizzazione, lo scopo è quello di ricavare un insieme di "conci" costituiti da facce prevalentemente piane, dunque di un insieme di poliedri.

Consideriamo uno dei gusci ricavati dalle prove di *digital form finding* precedentemente eseguite e completate effettuandone il paneling mediante la distribuzione e planarizzazione (cfr. cap.VI, par. 6.2) del pattern esagonale (fig.9.29).

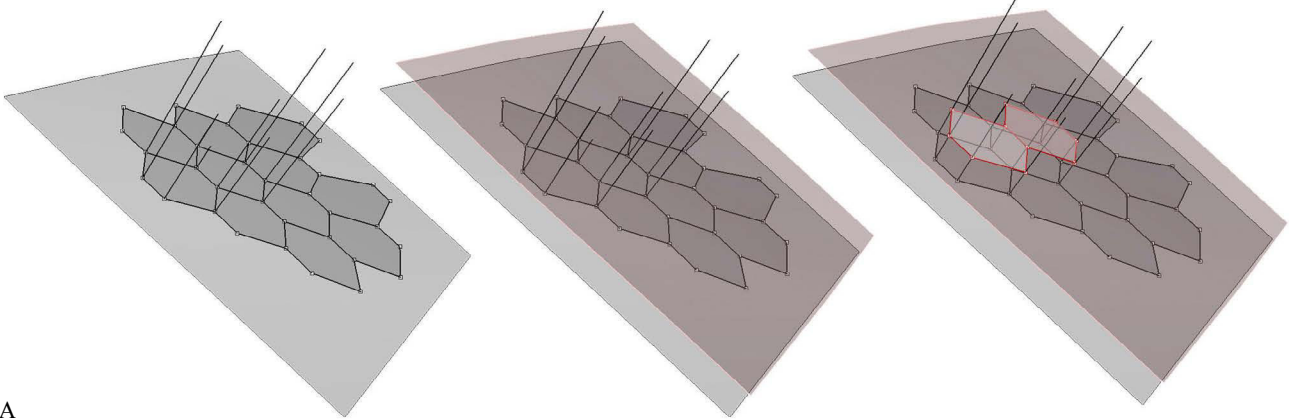
I software a disposizione per la sperimentazione non consentono di eseguire l'offset di un insieme di punti. Dunque, per eseguire l'offset vertex di tale insieme è stato effettuato l'offset della superficie patch ricavata interpolando i vertici di ciascuno dei tasselli esagonali (fig.9.30, in corrispondenza dei quali sono state ricavate le normali alla stessa. L'intersezione tra le normali alla patch e la superficie "offsettata" consente di individuare i vertici di un nuovo insieme di tasselli esagonali posti ad una distanza arbitraria dai vertici della tassellazione di partenza. Infine, è possibile congiungere i vertici dei tasselli di origine con i vertici dei corrispondenti elementi "offsettati".

Tutti i segmenti individuati rappresentano gli spigoli di un "concio", le cui facce superiori ed inferiori coincidono con gli esagoni dei sistemi discreti di partenza e "offsettato", mentre le facce laterali sono rappresentate da superfici curve (fig. A,,A1).

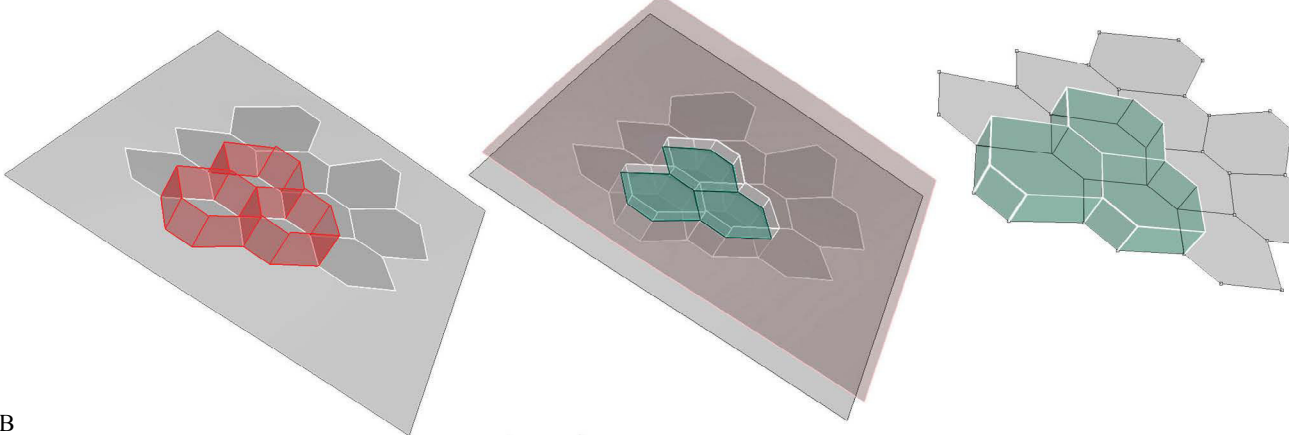
Per ottimizzare ulteriormente la geometria dei conci ricavati, è possibile eseguire l'estrusione lineare dei lati dei tasselli esagonali piani del sistema discreto di partenza, generando delle superfici piane adiacenti, costruite sui bordi degli esagoni di base. L'intersezione di tali superfici piane con l'offset patch precedentemente generata individua i lati degli elementi esagonali piani di un ulteriore sistema discreto.

In questo modo tutte le facce dei poliedri che compongono il sistema sono piane (fig. B,B1)).

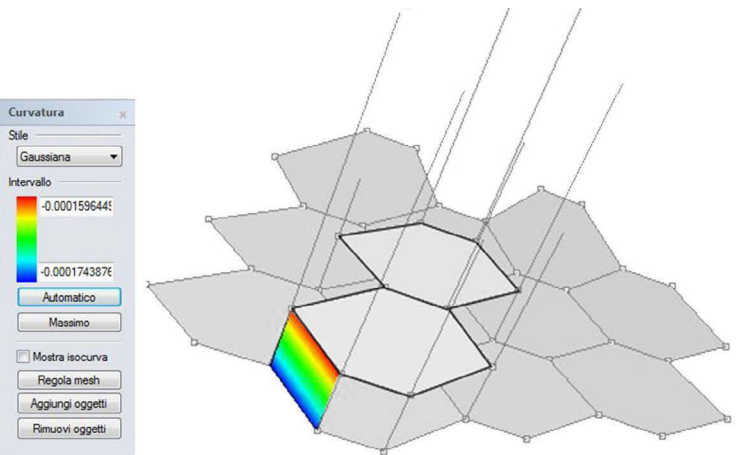
Questo vantaggio favorisce la possibilità di valutare un possibile ap-



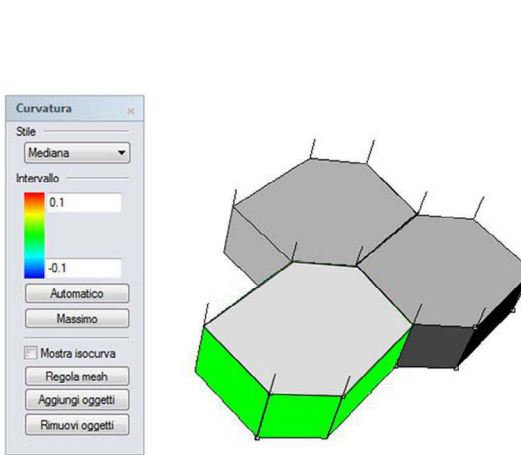
A



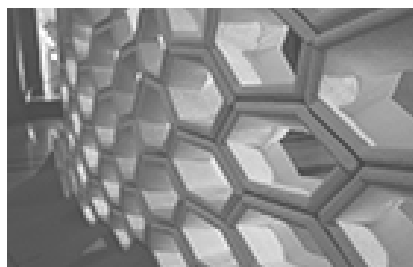
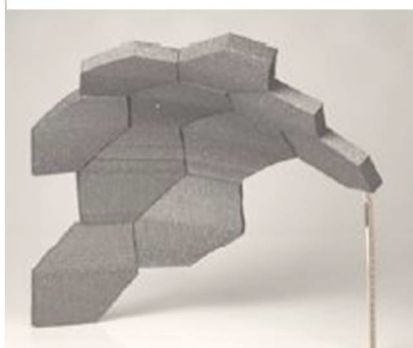
B



A1



B1



proccio stereotomico rivolto alla fabbricazione di forme complesse. La stereotomia è un settore che studia le costruzioni in pietra da taglio composte da elementi realizzati fuori opera secondo accurati processi di prefabbricazione, il cui insieme costituisce un'apparecchiatura che sussiste nella sua forma per le sole geometrie delle parti che la compongono. La forma delle parti deve essere progettata fuori opera per essere opportunamente posata a secco a comporre un insieme architettonico organico.¹²

In sostanza, tale scienza studia il disegno, per mezzo di regole proiettive, delle sagome delle facce dei conci di un sistema per consentirne il taglio e quindi la realizzazione.¹³ Un sistema stereotomico, in virtù del numero di suddivisioni, può restituire alla vista la percezione dell'esatta curvatura del sistema continuo di origine.

Nell'ambito della Stereotomia, è possibile distinguere tre principi-invarianti: l'invariante prefigurativo, ovvero la capacità di suddividere un sistema in parti, l'invariante tecnico/geometrico, ovvero la capacità di descrivere tanto la geometria del sistema, quanto quella degli elementi che lo discretizzano e l'invariante statico, ovvero la capacità di assicurare l'equilibrio statico del sistema architettonico mediante l'assemblaggio a secco dei conci.¹⁴ Sulla base di tali principi, la progettazione stereotomica studia la suddivisione in parti di un sistema continuo: la geometria di ogni elemento, o concio, è indissolubilmente legata alla natura e alle trasformazioni dell'intero sistema. Analogamente a quanto accade per i sistemi discreti indagati la parte viene descritta non in se, estrapolata dal contesto di appartenenza, ma dipendente fortemente dalla configurazione del tutto da cui non può scindersi.¹⁵ Pertanto, è interessante proporre la possibile applicazione di tali principi per indagare una soluzione alternativa al problema della realizzazione delle forme complesse. In un approccio che muove dall'*offset* di un sistema discreto, generato in seguito alla discretizzazione di una superficie complessa, i "mattoncini" ricavati saranno, necessariamente, tutti differenti gli uni dagli altri. Lo sviluppo di tale tecnica necessita di una trattazione teorica mirata, che muove dai principi descritti all'interno dei trattati antichi di stereotomia e indagati dalle successive ricerche realizzate in merito. Grazie all'affinità concettuale con gli attuali sistemi integrati di progettazione e di *Digital fabrication*, la stereotomia si configura, dunque, come una scienza più che mai attuale: Le fasi che scandiscono un processo di *Digital Stereotomy*¹⁶ sono: form finding, tassellazione,

taglio dei conci (*voussoir*) e assemblaggio.¹⁷

Tra i gruppi impegnati nello sviluppo di approcci di *Digital Stereotomy*, emerge il *Bloch research Group* dell'ETH Zurich,¹⁸ le cui ricerche mirano a sviluppare dei metodi per la tassellazione di sistemi voltati complessi mediante la distribuzione di blocchi pieni (fig.9.36).¹⁶

A tale scopo, la possibilità di sfruttare le *Offset-mesh* nel campo della *Digital Stereotomy*, dimostra l'utilità del lavoro di indagine e di sistematizzazione affrontato nei capitoli precedenti, in quanto, alla base di una progettazione di tipo stereotomico, inevitabilmente risiedono le conoscenze necessarie per il controllo geometrico della morfologia complessiva dell'organismo architettonico e delle sue parti.¹⁹

Appare, dunque, interessante coniugare la conoscenza approfondita della natura delle superfici complesse e delle tecniche di razionalizzazione indagate con le conoscenze dei principi di base della scienza stereotomica.

Note

¹ B. Munari, *Fantasia, invenzione, creatività e immaginazione nelle comunicazioni visive*, Editori Laterza, Bari, 2012, p. 29

² *Optimised building*, ARC - International innovation – Disseminating science, research and technology – 2013 – WWW.RESEARCHMEDIA.EU

³ Y. Liu, H. Pottmann, J. Wallner, Y.-Liang Yang, W. Wang, *Geometric Modeling with Conical Meshes and Developable Surfaces*, p. 8

⁴ M. Sasaki, Toto, *Flux Structure*, (2005)

⁵ T. Maure, E. O'Grady, E. Tung, *Inverse hanging membrane: the Naturtheater Grötzingen*, in The evolution of german shells: efficiency in form, 2013 - <http://shells.princeton.edu/Grotz.html>

⁶ A. Tedeschi, *Algorithmic Aided Design*, 2014, pp. 353-359

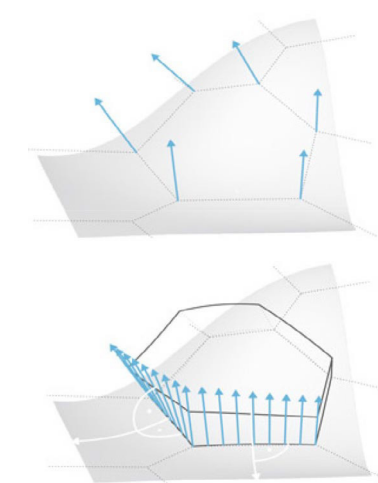
⁷ La procedura di planarizzazione è stata illustrata all'interno del sesto capitolo e ripresa all'interno dell'ottavo capitolo. Inoltre, gli strumenti utilizzati sono stati elencati nella premessa alla parte terza.

⁸ S.FIORI, Y. Nagai, F. Isvoranu, H. Pottmann, J.Wallner, *Ruled Free Forms*, in Advances in Architectural Geometry 2012, p. 57

⁹ A. Tedeschi, *Algorithmic Aided Design*, 2014, pp. 353-359

¹⁰ E' noto che l'equazione di una curva catenaria è: $y=a \cos h(x/a)$

Galileo, studiando la curva di sospensione di una catena, erroneamente, identificò la catenaria con la parabola. Nel 1669, il matematico tedesco Joachim Jungius



9.31,32,35 - Esperimenti di *Digital Stereotomy* presso il Bloch research Group dell'ETH Zurich.
9.33 - *La route de Lefevre*, Brandon Clifford and Wes McGee, (2012)
9.34 - M. Z. Huber, *Pinch wall*, 2010
9.36 - Studi di *Digital Stereotomy* condotti dal Bloch research Group: per generare i conci sono state utilizzate le normali alla superficie lungo i bordi dei tasselli.

(1587-1657), dimostrò che quella curva non era una parabola.

¹¹ E' possibile simulare il comportamento di una catenaria applicando lo stesso processo utilizzato per rilassare una membrana. In questo caso è necessario partire dalla suddivisione di una curva in un certo numero di punti e di segmenti, successivamente trasformati in springs (molle). Queste, insieme ai vettori *Unary force*, applicati su ciascuno dei punti, e ai punti di ancoraggio coincidenti con gli *end points* delle curve, rappresentano il sistema di forze da inserire nel *Kangaroo Engine*.¹⁵

h M. Salvatore, C. Trevisan, *Stereotomia della pietra*, in R. Migliari, Geometria Descrittiva – Volume II – Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, p. 486

¹³ G. Fallacara, *Verso una progettazione stereotomia*, ARACNE editrice S.r.l., 2007, p.36

¹⁴ *Ibidem*, p.40

¹⁵ *Ibidem*, p. 144

¹⁶ M. Rippmann, P. Block, *Digital Stereotomy: Voussoir geometry for freeform masonry-like vaults informed by structural and fabrication constraints*,

¹⁷M. Rippmann, P. Block, *Freeform Stone Vaults Based on Ruled Surfaces*, p.183

¹⁸<http://block.arch.ethz.ch/brg/research/project/digital-stereotomy>

¹⁹ M Salvatore, C Trevisan, *Op. cit.*, p.486

Bibliografia

A

- Afify H. M. N., Elghaffar Z. A. ABD, *Advanced digital manufacturing techniques (CAM) in architecture*, in 3rd Int’l ASCAAD Conference on Em’bodying Virtual Architecture, ASCAAD-07, Ain Shams University, Alexandria, Egypt, 2007
- Al-Khwārizmī Muhammad ibn Mūsā, *Algoritmi de numero Indorum*, a cura di B. Boncompagni, in Trattati d’Aritmetica, Tip. delle Scienze Fisiche, Roma, 1857
- Alliez P., Steiner D.C., Devillers O., Lévy B., Desbrun M., *Anisotropic Polygonal Remeshing*, in Rapport de Recherche, n. 4808, Aprile 2003
- Antonioli E., *Robot e Architettura*, pp. 60-64 in Nuova Finestra n. 402, Maggio 2014, DB Information
- Aymonino A., Mosco V.P., *Spazi pubblici contemporanei. Architettura a volume zero*, Skira Editore, Milano, 2006

- *Advances in Architectural Geometry (AAG) - Conference Proceedings*, Springer, Wien NewYork, 2008-2010-2012-2014
- ACM Siggraph, <http://www.siggraph.org/>
- AA.VV. *Uno (nessuno) centomila - prototipi in movimento* - Teatro di Posa-Lab Foto, Politecnico di Milano,Campus Bovisa-Edificio N, Marzo 2014
- AA.VV. *La Geometria Descrittiva dalla tradizione all’innovazione*, Roma, 9 Giugno 2014
- AA.VV. *La Musa elettronica*, seminario Tedeschi-Pugnale (2014), Diarc, Napoli 16 dicembre 2014

B

- Baglioni L., *La Discretizzazione delle superfici continue*, Tesi di Dottorato, Tutors: Laura De Carlo, Riccardo Migliari, Università La Sapienza, Roma, Dottorato in Scienze della Rappresentazione e del Rilievo, XXI ciclo
- Baglioni L., *Nuove applicazioni della geometria descrittiva: le PQ mesh nell’architettura contemporanea*, in Disegnare con, 9 giugno 2012
- Baglioni L., *I poliedri regolari e semiregolari con un approfondimento sulle cupole geodetiche*, in R. Migliari, Geometria Descrittiva, Volume II – Tecniche e Applicazioni,Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, pp.299-417
- Baldassini N., Pottmann H., Raynaud J., Schiftner A., *New Strategies and Developments in Transparent Free-Form Design: From Facetted to Nearly Smooth Envelopes*, in International Journal of Space Structures, Vol. 25, n. 3, September 2010
- Baldassini N., Raynaud J., *Free-form, form finding and anisotropic grid shell*, in Evolution and Trends in Design, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia, 2009

- Baldassini N., *Geometry, mechanics and the environment: integrated transparent thinking*, in Laminated Glass/Process/Design, Glass Performance Days, Finland 2009, -www.gpd.fi

- Banham R., *Theory and Design in the First Machine Age*, The MIT Press (2nd Edition), Cambridge, 1980

- Barbero L. M., Azimut|h. *Continuità e nuovo*, Marsili Editore, Venezia, 2014

- Basso P., *Optimal form-finding algorithms for the control of structural shapes*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria civile, tutor A. E. Del Grosso, Facoltà di Ingegneria, Università di Pavia, XXIV ciclo, 2012

- Berman M., *L'esperienza della modernità*, Il mulino, Bologna, 1978

- Berry M. V., Hannay J. H., "Umbilic points on Gaussian random surfaces", in J. Phys. A: Math. Gen., Vol. 10, No. 11, 1977

- Bertozzi P., Ghini A., Guardigli L., *Le forme della tradizione in architettura. Esperienze a confronto*, Franco Angeli, Milano, 2006

- Beyer J., *Designing Tessellations: the Secrets of Interlocking Patterns*, Contemporary Books, Chicago, 1999

- Biondi E., *Quando l'Architettura nasce da una goccia d'acqua. Le strutture Blob*, Tesi di Laurea, Facoltà di Architettura, Politecnico di Torino, 2006

- Bobenko A. I., Suris Y., *Discrete Differential Geometry: Integrable structure*, Volume 98 of Graduate Studies in Mathematics, American Mathematical Society, 2008

- Bohm, C. Jacopini G., *Flow Diagrams, Turing Machines and Languages with Only Two Formation Rules*, in Communications of the ACM, vol. 9, n° 5, maggio 1966, pp. 366–371

- Bommes D., Campen M., Ebke H.-C., Alliez P., Kobbelt L., *Integer-Grid Maps for Reliable Quad Meshing*, ACM Trans. Graph. 32, July 2013

- Boncompagni B., *Algoritmi de numero Indorum*, in Trattati d'Aritmetica, Tip. delle Scienze Fisiche, Roma, 1857

- Borger E., *Teoria della computazione*, Bollati Boringhieri, Torino, 1989

- Brell-Cokcan S., Schmiedhofer H., A., Schiftner, Ziegler R., *Structurize- Planarize - Materialize. Designing Arbitrary Multi-Layered Freeform Building Envelopes with PQ-Meshes, Innovative Design & Construction Technologies - Building complex shapes and beyond* - University of Technology Vienna, Waagner Birò, May, 6-7th 2009,

- Brell-Cokcan S., Reis M., Schmiedhofer H., Braumann J., *Digital Design to Digital Production. Flank Milling with a 7-Axis CNC - Milling Robot and Parametric Design*, Session 09: Modes of Production - eCAADe 27, Istanbul, Turkey, 2009

- Brizzi M., *ARCH'IT: Kas Oosterhuis. Il lato selvaggio dell'architettura*, 1999 (<http://architettura.supereva.com/files/19991100/index.htm>)

- Brough E., *Islamic Geometric Patterns*, Thames & Hudson, Pap/Cdr edizione, UK, 2008

C

- Calvano M., *Impronte Digitali* - mcarchitetture.blogspot.it, gennaio 2014

- Calvano M., *Continuità Limitata. Rappresentazioni discrete per il disegno delle forme*, IQ/2 Papers, www.istitutoquasar.com 2013

- Campi M., *Disegno + Digitale. Esperienze didattiche di rappresentazione e grafica per l'Architettura*, Editore Aracne, Roma, 2005

- Campi M., *L'indagine multimediale della forma. Dal lessico geometrico alle simulazioni previsionali per la rappresentazione dell'Architettura*, Editrice Gaia, 2007

- Capone M., *Geometria per l'Architettura*, Giannini Editore, Napoli, 2012

- Capone M., *La genesi dinamica della forma*, Fridericiana Editrice Universitaria, Napoli, 2010

- Cappelli S., *Gli Achromes*, in Archivio opera Piero Manzoni - Fondazione Piero Manzoni, www.pieromanzoni.org, p.2

- Casale A., Valenti Mario G., *Architettura delle superfici piegate - Le geometrie che muovono gli origami*, con il contributo di M. Calvano, Edizioni kappa, Roma, 2012

- Catuogno R., *Luce, forma e struttura: la geometria come processo conoscitivo dell'opera di Gaudì*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Tecnologia e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente (XIX ciclo), Facoltà di Architettura, Università degli Studi di Napoli "Federico II", Napoli, 2007

- Ceccato C., Hesselgren L., Pauly M., Schiftner A., Pottmann H., Wallner J., *Foreward*, in *Advances in Architectural Geometry 2010*, Springer-Verlag/Vienna New York, 2010

- Ciammaichella M., *La pelle dell'architettura contemporanea*, Aracne, Roma, 2007

- Ciammaichella M., *Architettura in Nurbs*, Editore Testo & Immagine, Torino, 2002

- Ciammaichella M., *Processi di sviluppo delle superfici. Architettura e moda a confronto*, in Geometria Descrittiva e Rappresentazione Digitale. Memoria e Innovazione, a cura di A. Casale, Volume II, Edizioni Kappa, Roma, 2013

- Ciammaichella M., *Artefatti in evoluzione. La rappresentazione matematica fra design generativo e pratiche numeriche*, in Disegnare Con, 9 giugno 2012

- Ciarloni R., *Le teorie e le tecniche della rappresentazione matematica - Strategie di modellazione nei sistemi CAD*, in R. Migliari, Geometria Descrittiva, Volume II – Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, p.8

- Cirafici A., *Il disegno di architettura e la questione della tecnica : teoria e prassi nell'architettura del ferro*, Tesi di Dottorato in rilievo e rappresentazione del costruito, VII ciclo, Università degli studi di Napoli Federico II, Napoli, 1996

- Critchlow K., *Order in Space: A Design Source Book*, Thames & Hudson, London, 1969

D

- D'arcy Wentworth T., *Crescita e forma*, Bollati Boringhieri, Torino, 1992

- De Fusco R., *Storia del Design*, Editori Laterza, Roma-Bari,2009
- De Fusco R., *Filosofia del Design*,Giulio Einaudi Editore, Torino,2012
- De Kerckhove D., *Architettura dell'intelligenza*, Editore Testo & Immagine, Torino,2001
- Deleuze G., *La piega. Leibniz e il barocco* (1988), tr. Davide Tarizzo, Einaudi, Torino, 2004.
- Deleuze G., *Differenza e ripetizione*, Editore Cortina Raffaello,Milano,1997
- Demartini E., Gatti C., Tonetti L., Villa E. P., *Il nuovo Vivere l'arte 3,Dall'Ottocento ad oggi*, Bruno Mondadori,Bologna,2011
- Duhem P. M., *Verificazione e olismo*, a cura di Mirella Fortino, Armando, Roma, 2006

E

- Ebke H. C., Bommes D., Campen M., Kobbelt L., *QEx:Robust Quad Mesh Extraction*, in ACM TOG 32(6), New York, 2013
- Eigensatz M., Schiftner A., *Case Studies in Optimization of Glass-panelized Architectural Freeform Designs*, in Glass Performance Days Conference Proceedings: "Glass and Solar in Sustainable Development, Finland, 2011
- Eigensatz M., Schiftner A., *Paneling the Eiffel Tower Pavilions. Case Studies in Optimization of Glass-panelized Architectural Freeform Designs for the Eiffel Tower Pavilions*, in Glass Performance Days Proceedings, Finland, 2011
- Eigensatz M., Kilian M., Schiftner A., Mitra N. J., Pottmann H., Pauly Mark, *Paneling Architectural Freeform Surfaces*,ACM SIGGRAPH 2010,Seoul,South Korea, 2010
- Eigensatz M., Deuss M., Schiftner A., Kilian M., Mitra N. J., Pottmann H., Pauly M., *Case Studies in Cost-Optimized Paneling of Architectural Freeform Surfaces*, in Advances in Architectural Geometry 2010, , Springer-Verlag/Vienna New York,2010
- Escher M. C., *Grafica e Disegni*, Benedikt Taschen, Berlino, 1990

F

- Fallari T., *Topologia di un mandala*, Edizioni del Leone,Venezia,1991
- Fallacara G., *Verso una progettazione stereotomica, Nozioni di stereotomia,stereotomia digitale e trasformazioni topologiche: ragionamenti intorno alla costruzione della forma*. Aracne editrice S.r.l., Roma, 2007
- Fallavolita F., *La costruzione di una superfici rigata generica*, in R. Migliari, Geometria Descrittiva, Volume II - Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara p. 161
- Fantini F., *Teorie e tecniche della rappresentazione numerica o poligonale*, in R. Migliari, Geometria Descrittiva, Volume II – Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009, p.63
- Fassino M., *La progettazione parametrica come strumento di analisi: dai pattern algoritmici*

decorativi ai pattern "performanti", esempi nei Beni Culturali, Tesi di Dottorato, tutor prof. Arch. A. Marotta, Politecnico di Torino, Dottorato di Ricerca in Beni Culturali, XXIV Ciclo

- Fildhuth T., Knippers J., Bindji F., Odzili, Baldassini N., Pennetier S., *Comportamento del vetro laminato piegato a freddo-analisi numerica e test*, in Challenging Glass 4 Cost Action TU0905 Final Conference - Louter, Bos, Belis & Lebet (EDS), Taylor & Francis Group, London,2014
- Fileti Mazza M., *Il mosaico tra passato e presente*, in Minuti Menarini, n. 320 - maggio 2005
- Florio R., *Origini, evoluzioni e permanenze della classicità in architettura. Un'esperienza di conoscenza. Disegno e rappresentazione dell'architettura*, Officina Edizioni, Roma,2004
- Florio R., *Sul Disegno: riflessioni sul Disegno di Architettura*,Officina Edizioni, Roma,2012
- Foletto M., Guagnini M., *Progettare l'involucro edilizio. Risultati delle prime esperienze condotte presso il politecnico di Torino*, in L'involucro edilizio: una progettazione complessa , a cura di Greco A., Quagliarini E.,Alinea Editrice, Firenze, 2007
- Folgiani T., *Dipendenza dal campo e stile cognitivo*,T. Fogliani Messina - OS Firenze,1984 - pp. 163
- Frampton K., *Storia dell'Architettura moderna*, Zanichelli Editore,Bologna,2008

G

- Galasso D., Villard de Honnecourt. La rivoluzione strutturale del medioevo, Archigrafica, 2008.
- G. Galilei, *De revolutionibus orbium coelestium*, Copernico N., Basilea, 1543
- Galizia M., Santagati C., *Architettura e/è" Geometria: dalla forma architettonica alla costruzione geometrica*, in Disegnare con, giugno 2012
- Gauss C. F., *Disquisitiones generales circa superficies curvas*, Usa ,2012
- Gershenfeld N., *Fab. Dal personal computer al personal fabricator*, traduttore: I. Manzoni, Editore Codice, 2005 da http://it.wikipedia.org/wiki/Neil_Gershenfeld
- Ghang L., Seonwoo K., *Case Study of Mass Customization of Double-Curved Metal Facade Panels Using a New Hybrid Sheet Metal Processing Technique* - 1322 / Journal of construction Engineering and management © ASCE / NOVEMBER 2012
- Giedion S., *Breviario di Architettura*, Bollati Boringhieri Editore, Torino, 2008
- Gilardi M., *Ritmi e Simmetrie*, Editore Zanichelli, Bologna, 1986
- Giordano A.,*La geometria nell'immagine*, UTET, Torino, 2000
- Glymph J., Shelden D., Ceccato C., Mussel J., Schober H., *A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets*, in Automation in Construction 13 (2004), pp.197-199
- Gottfried A., *Le strutture*, in Manuali di progettazione edilizia, Hoepli Editore, 2003, p. 210

- Gramazio & Kohler, R. D'Andrea, *Flight Assembled Architecture* - Editions Hyx, 2013 - <http://www.gramaziokohler.com/web/d/publikationen/index.html>
- Greco A., Quagliarini E., *L'involucro edilizio: una progettazione complessa.*, Alinea Editrice, Firenze, 2007
- Grigis L., *Evoluzione del mosaico* - www.edatlas.it
- Grunbaum B., Shephard G.C., *Tilings by Regular Polygons. Patterns in the plane from Kepler to the present, including recent results and unsolved problems*, Mathematics Magazine, n.5, vol. 50, 1977

H

- Hambleton D., Howes C., Hendricks J., Kooymans J., Yolles H., *Study of Panelization Techniques to Inform Freeform Architecture, Architectural Challenges & Solutions*, Glass Performance Days, 2009, p. 2, www.gpd.fi
- He Y., *Implementing Customized Metal Panels in Architectural Freeform Surfaces*, Faculty of Architecture, Delft University of Technology, 2014, p.4
- Hesselgren L., Sharma S., Wallner J., Baldassini N., Bompas P., Raynaud J., *Foreword*, in *Advances in Architectural Geometry 2012*, Springer-Verlag/Vienna New York, 2012
- Hobinger M., *Packing circles and spheres on surfaces*, Diploma Thesis, supervised by o.Univ.-Prof. Dr. Helmut Pottmann, Institute of Discrete Mathematics and Geometry, Vienna University of Technology,

I

- Ippolito A., *Interazione tra Disegno e Architettura Digitale*, Tesi di Dottorato di Rilievo e Rappresentazione dell'Ambiente, Università degli studi di Roma "La Sapienza", Roma, 2006
- Issa R., *Essential Mathematics for Computational Design*, Robert McNeele & Associates, 2009
- Iwamoto L., *Digital Fabrications Architectural and Material Techniques*, Princeton Architectural Press, New York, 2009
- Il grande Dizionario Garzanti della Lingua italiana, Garzanti Editore

J

- Jenny H., *Kymatic/Cymatics* 2 vols, Basilius Presse, Basel, (1967,1974)

K

- Kandinskij V., *Punto, linea, superficie*, Adelphi Edizioni, Milano, 1968
- Khuwarizmi Al, *Algoritmi de numero indurum*, Baldassarre Boncompagni, Roma, 1857
- Kolarevic B., *Architecture in the digital age. Design and Manufacturing*, Editore Spon Press, London, 2003

L

- Leduc N., Raynaud J., Baldassini N., *Project for the Eiffel Tower: Constructive Geome-*

- try*, in *Challenging Glass 3 - Conference on Architectural and structural applications of glass* - Bos, Louter, Nijse, Veer (Eds.), IOS Press, Delft, 2012,
- Leggerini S., *La Natura non spreca energie. Architettura e bolle di sapone*. Otto Frei e Chris Bosse, UTEM, 2010
- Le Ricolais R., *A la recherche d'une mécanique des formes*, in Conférence donnée au Palais de la Découverte (Alençon, Impr. alençonnaise), Paris, 1965
- Li Y., Liu Y., Wang W., *Planar Hexagonal Meshing for Architecture*, <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/yangliu/publication/phex.pdf>
- Lindsey B., *Digital Ghery*, Editore Testo & Immagine, Torino, 2001
- Liu Y., Pottmann H., Wallner J., Yang Y-L, Wang W., *Geometric Modeling with Conical Meshes and Developable Surfaces*, ACM Trans. Graphics, Vol 25 n.3, New York, Usa, 2006, pp. 681-689
- Liu J., Li S., Chen Y., *A fast and practical method to pack spheres for mesh generation*, Acta Mechanica Sinica, August 2008, Volume 24, Issue 4, Springer, 2008
- Liu Y., Xu X., Wang J., Zhu L., Guo B., Chen F., Wang G., *General Planar Quadrilateral mesh Design using conjugate direction field*, in *Journal ACM Transactions on Graphics*, 2011
- Loria G., *Poliedri, curve e superfici secondo i metodi della geometria descrittiva*, Editore U. Hoepli, Milano, 1912
- Luo X., *Process Planning for an additive/Subtractive rapid Pattern Manufacturing system*, Graduate Theses, Iowa State University, Ames (Iowa) (USA), 2009
- *L'Universale*. La grande enciclopedia tematica, Garzanti Libri S.p.A., Volume I, Milano, 2004

M

- *Manuali di progettazione edilizia*, Hoepli Editore, 2003
- Mainos D., *Architectural Design and avancedechnourgia* (Gravina)
- Mandelbrot B. B., *Gli oggetti frattali: forma, caso e dimensione*, Giulio Einaudi Editore, Torino, 2000
- Martì Aris C., *La centina e l'arco. Pensiero, teoria, progetto in architettura*, Marinotti Editore, Milano, 2007
- Maure T., O'Grady E., Tung E., *Inverse hanging membrane: the Naturtheater Grötzingen* (1977), in *Evolution of German Shells: Efficiency in form*, CEE463 course "A social and multi-dimensional exploration of structures", Princeton University, Germany, 2012,
- Migliari R., *Per una Geometria Descrittiva Attuale*, (<http://www.arch.unige.it/eve/convegni/lerici/migliari.pdf>)
- Migliari R. *Geometria Descrittiva – Volume II – Tecniche e Applicazioni*, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009
- Miura K., Tachi T., *Synthesis of rigid-foldable cylindrical polyhedra*, Symmetry: Art

and Science, Gmuend (Austria), 2010

- Munari B., *Da cosa nasce cosa*, Editore Laterza, Bari, 2010

- Munari B., *Il cerchio*, Corraini Edizioni, Mantova, 2014

- Munari B., *Fantasia*, Editori Laterza, Roma-Bari, 2006

- Munari B., *Design e comunicazione visiva*, Editore Laterza, Roma-Bari, 2002

N

- Nebuloni A., Romero M., Vignati G., Gicopelli A., La Marca A., *Responsive Morphologies*, Politecnico di Milano, 22 settembre 2014

- Newton I., *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Londini, Jussi Societatus Regiae ac Typis Josephi Streater; prostat apud plures bibliopolas, 1687

- Nieser M., Palacios J., Polthier K., Zhang E., *Hexagonal Global Parameterization of Arbitrary Surfaces*, IEEE Transactions on visualization and computer graphics, vol. 18, n. 6, june 2012

- Novak M., *Liquid architectures in cyberspace*, MIT Press Cambridge, USA, 1991

O

- Optimised building, ARC - International innovation “ Dissemineting science, research and technology, 2013

P

- Paoletti I., *Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura*, Libreria CLUP, Milano, 2006

- Paoletti I., Converso S., *Da Gehry in avanti*, http://ftp2.bentley.com/dist/collateral/docs/press/Da-Gehry-in-Avanti_Modulo_IT.pdf, Giugno 2010, p. 520

Papadopoulos A., *Handbook of Teichmüller Theory*, Volume 2, EMS Publishing House, Zurich, 2009

- Pastorello F., *Applicazione di Algoritmi di Nesting alla robotica industriale*, Tesi di Laurea, Relatore: prof. Giovanni Boschetti, Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale, Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria, Padova, 2010-2011

- Paz O., *I confini della modernità*, Casabella, Mondadori, Milano, Febbraio 1999

- Paz O., *Octavio Paz, Béla Lajta, Craig Ellwood: metamorfosi della modernità. Che cos'è la modernità?*, in Casabella 664, p. 48, Mondadori, Milano, febbraio 1999

- Piscitelli M., *La rappresentazione nell'era digitale*, Università degli studi di Roma “La Sapienza” Editore Vivarium, Roma, 2013

- Pizzi E., *Verso la riduzione della filiera progettuale per ottimizzare i processi produttivi ai fini della innovazione e della competitività*, Dipartimento ABC, Politecnico di Milano, in *TECHNE* 06 2013

- Pone S., *L'idea di struttura*, Editore Franco Angeli, Milano, 2005

- Porrino M., *Saper credere in Architettura : 130 domande a presidi di Architettura*, Gianni Braghieri, Benedetto Gravagnuolo, Carlo Magnani, Antonio Monestiroli. CLEAN Edizioni, Napoli, 2004

- Pottmann H., Liu Y., Wallner J., Bobenko A., Wang W., *Geometry of Multi-layer Freeform Structures for Architecture*, in ACM Trans. Graphics, Vol 26, Issue 3, 2007

- Pottmann H., Chapter 15 : *Developable surfaces and unfoldings*, in Pottmann H., Asperl A., Hofer M., Kilian A., Architectural Geometry, Bentley institute Press-Vienna New York, 2007 pp. 534-535

- Pottmann H., Wallner J., *The focal geometry of circular and conical meshes*, Geometry preprint 163, Technische Universität Wien (Austria), August 2006

- Pottmann H., *Architectural Geometry and Fabrication-Aware Design*, in Nexus Network Journal, Volume 15, Issue 2, pp 195-208, 2013

- Pottmann H., Schiftner A., Wallner J., *Geometry of Architectural Freeform Structures*, Internat.Math. Nachrichten, n. 209, Wien (Austria), 2008

- Pottmann H., Schiftner A., Bo P., Schmiedhofer H., Wang W., Baldassini N., Wallner J., *Freeform surfaces from single curved panels*, ACM SIGGRAPH 2008, Article No. 76, New York, USA, 2008

- Pronk A., Van Rooy I., Schinke P., *Double-curved surfaces using a membrane mould*, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia, 2009

- Pugnale A., *(Digital) form finding*, in Arturo Tedeschi, Algorithmic Aided Design, Edizioni Le Pensur, Napoli, 2014

R

- Reichenbach H., *Da Copernico a Einstein*, Editore Laterza, Bari, 1985

- Rippmann M., Block P., *Digital Stereotomy: Voussoir geometry for freeform masonry-like vaults informed by structural and fabrication constraints*, Proceedings of the IABSE-IAAS Symposium 2011, London, UK, 2011

- Rippmann M., Block P., *New Design and Fabrication Methods for Freeform Stone Vaults Based on Ruled Surfaces*, Proceedings of Design Modeling Symposium 2011, Berlin, Germany, 2011

- Rossi M., *Realtà e immaginazione: nuove forme e antiche simmetrie*, in Disegnare, Idee Immagini n.38, Rivista semestrale del Dipartimento di Rappresentazione e Rilievo dell'Università degli studi di Roma “La Sapienza”, Gangemi Editore, 2009

- Rustichelli L., *La profondità della superficie: Senso del tragico e giustificazione estetica dell'esistenza in Friedrich Nietzsche*, Ugo Mursia Editore, Milano, 1992

S

- Salvatore M., Trevisan C., *Stereotomia della pietra*, in R. Migliari, Geometria Descrittiva – Volume II – Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni De Agostini, Novara, 2009

- Sauer R., *Differenzengeometrie*, Springer, Berlin, 1970

- Schiftner A., *Planar quad meshes from relative principal curvature lines*, Diploma Thesis, supervised by o. Univ-Prof. Dr. Helmut Pottman, Institute of Discrete Ma-

thematics and Geometry, University of Technology, Wien, 2007

- Schiftner A., Eigensatz M. Kilian M., Chinzi G., “*Large scale double curved glass facades made feasible* ” *The Arena Corinthians West Facade, Sao Paulo*, in GLASS PERFORMANCE DAYS 2013 - www.gpd.fi

- Schiftner A., Leduc N., Bompas P., Baldassini N., Eigensatz M., *Architectural Geometry from Research to Practice: The Eiffel Tower Pavilions*, in Advances in Architectural Geometry 2012, a cura di Hesselgren, Sharma, Wallner, Baldassini, Bompas, Raynaud, Springer-Verlag/Vienna New York , 2012

- Schmiedhofer H., BrellCokcan S., Schiftner A., Ziegler R., *Design and panelization of architectural free form surfaces by planar quadrilateral meshes*, in Advances in Architectural Geometry 2008, Springer-Verlag/Wien, New York, 2008

- Scolari M., *Il Disegno Obliquo. Una storia dell'antiprospectiva*, Editore Marsilio, Venezia, 2005

- Sdegno A., *E. Architecture. L'architettura nell'epoca del computer*, in Casabella n°691, 2001

- Shimada K., D. C. Gossard, *Bubble Mesh: Automated Triangular Meshing of Non-Manifold Geometry by Sphere Packing*, In: Proc. 3Rd ACM Symp Solid Modeling and Applications (SMA 1995) pp.409-419

- Shumaker P., *Hadid digitale: paesaggi in movimento*

Universale di architettura (Turin, Italy). Testo & Immagine, 2004

- Sklair L., *Architettura iconica e globalizzazione capitalista*, in Dialoghi Internazionali: Citta Nel Mondo, Bruno Mondadori, Milano, 2009

- Smith D. K. , Tardif M. , *Building Information Modeling: A Strategic Implementation Guide for Architects, Engineers, Constructors, and Real Estate Asset Managers*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey(USA), 2009

- Société d'exploration de la Tour Eiffel, *Le reaménagement global du 1er Etage de la Tour Eiffel. Construction de nouveaux pavillons et raménagement des espaces public* - Dossier de Presse, Actualité septembre 2013, Mairie de Paris

- Smuts J. C., *Holism and evolution*, Viking Press/Macmillan, New York, 1926

- Stavric M., Wiltche A., Freissling C., *Discretization of free-form surfaces by plane elements derived from tangent planes*, in Glass Performance Days 2011 - www.gpd.fi

- Stovicek J., *Axioms, algorithms and Hilbert's Entscheidungsproblem*, Department of Mathematical Sciences, NTNU, Norwegian University of Science and Technology, settembre 2009, pp. 4-7 - www.ntnu.no

T

- Tamagnone C., *Dal nulla al divenire della pluralità. Il pluralismo ontofisico tra energia, informazione, complessità, caso e necessità*, Editore Clinamen, Firenze, 2009

- Tedeschi A., *AAD_Algorithms Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*, Le Pensur Edizioni, Napoli, 2014

- Tong Y., Alliez P., Cohen-Steiner D., Desbrun M., *Designing Quadrangulations with Discrete Harmonic Forms*, in Eurographics Symposium on Geometry Processing (2006), Proceedings of the fourth Eurographics symposium on Geometry processing, Switzerland, 2006

- Tonelli D., *Progettare Involucri di Forma Libera: Ingegnerizzazione dell'Involucro*, Università di Pisa, Facoltà di Ingegneria, maggio 2013

- Tonelli D., *Sinossi sull' ingegneria delle forme libere*, p.4, Pisa, Marzo 2012

- Tosi M., *Il mosaico contemporaneo : tradizione, evoluzione, tecnica e conservazione*, Mondadori, Milano, 2004

- Tosi M., *Tessera dopo tessera - La tradizione del mosaico*, Istituto statale d'arte per il mosaico "Gino Severini" di Ravenna, Marzo 2005

- Troche C., *Planar hexagonal mesh by Tangent plane Intersection*, in Advances in Architectural Geometry 2008, Springer-Verlag/Vienna New York , 2008 , pp. 57-60

- Tshumi B., *Deconstruction in Architecture*, Moma, New York, 1988

V

- Vår L. I., Gaal M., *Cold Bendable laminated glass: new possibilities in design*, in Structuring Engineering International, Structural Design in Glass, 2/2004

- Valenti G. M., Romor J., *Geometria responsiva*, in Disegnare CON, vol.5, n.9, giugno 2012

- Valeri V., *Corso di Disegno*, La Nuova Italia Editrice, 1995

- Vaudeville B., King M., Aubry S., Raynaud J., Chalaux M., Witt A., *How Irregular Geometry and Industrial Process Come Together: A Case Study of the "Fondation Louis Vuitton Pour la Creation"*, Paris, in Advances in Architectural Geometry 2012, Springer-Verlag/Vienna New York , 2012

- Viollet Le Duc E.E., *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du 11^{me} au 16^{me} siècle*, 1854-68

- Visconti R., *Gli algoritmi*, in Compendio di Informatica – capitolo 2, da Compendio di Informatica, Edizioni Calderini, Bologna, 1988 (anno di revisione 2103)

- Vytisková A., *Diskrétní reprezentace ploch volného tvaru v architektonické geometrii*, advisor M. Lávička, Diplomová Práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2012

W

- Wallner J., Pottmann H., Tang C., Sun X., Gomes A., *Form-finding with Polybedral Meshes Made Simple*, in Journal ACM Transactions on Graphics, Vol. 33, Issue 4 , New York, USA, 2014

- Waibel M., *Architects Using Robots to Build Beautiful Structures* - 2011-<http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/industrial-robots/robots-in-architecture>

Y

Yang Y-L, Yang Y.J., Pottmann H., Mitra N.J., *Shape Space Exploration of Constrained Meshes*, ACM SIGGRAPH ASIA, 2011

Yi Cai Z., Hui Wang S., Dong Xu X., Zhe Li M., *Numerical simulation for the multi-point stretch forming process of sheet metal*, in Journal of Materials Processing Technology, Volume 209, Issue 1, 1 January 2009, pp. 396-407

Z

- Zadravec M., Schiftner A., Wallner J., *Designing Quad-dominant Meshes with Planar Faces*, in Computer Graphics Forum, Vol. 29, Issue 5, pp. 1671-1679, 2010

- Zerlenga O., *Rappresentazione geometrica e gestione informatica dei modelli*, La Scuola di Pitagora, Napoli, 2008

- Zimmer .H. J., *Optimization of 3D Models for Fabrication*, Diplom-Informatiker, 14 maggio 2014

- Zingarelli N., Lo Zingarelli. Vocabolario della Lingua Italiana, Zanichelli Editore, 2014

Sitografia

<http://www.archilab.org/public/2000/catalog/novak/novak06.htm>

<http://www.arch.rpi.edu/2011/10/oksiuta-zbigniew/>

<http://theverymany.com/>

<http://www.achimmenges.net>

<http://www.materialecology.com/>

<http://www.rvtr.com/research/resonant-chamber/>

Architectural Geometry, http://en.wikipedia.org/wiki/Architectural_geometry

School of Architecture/Student Work

Architecture as Catalyst: Bodies In Formation- Participants in 2012 Catalyst, Instructor Marc Swackhamer, Andrew Kudless, University of Minnesota, 2012

blog.lib.umn.edu/arch/studentwork/2012/03/architecture-as-catalyst-bodies-in-formation.html

Crealarte, Il surrealismo e Dalì - 2012 - <https://crealarte.wordpress.com>

Vetro curvo made in Italy per Brasile 2014, Il Mattino di Padova, articolo pubblicato il 28 maggio 2014 - <https://vallineleonora.wordpress.com/2014/05/31/vetro-curvo-made-in-italy-per-brasile-2014/>

Nesting, da <http://www.garzantilinguistica.it>

Nesting, da <http://www.garzantilinguistica.it>

RHinoNest- <http://www.tdmsolutions.com/rhinonest/>

Cilento R. - Facade engineering blog, Glass curved technology, 2011

<http://renatocilento.blogspot.it/2011/08/glass-curved-technology.html>

Walker A., *Materials&Wearables: “WoodenDress”*, 2011 - http://alliwalk.com/wooden_dress.html

Dotcomwomen, Wooden Fashion is in! - March 12, 2014 - <http://www.dotcomwomen.com/beauty/wooden-fashion-is-in/17444/>

Lea Peckre, Elisa Strozyk, Wooden Textile Dress - 21 january 2013- <http://www.wmnetwork.fr/wooden-textile-dress-lea-peckre-elisa-strozyk/>

By behind the apps, Un vestito stampato in 3D elastico come il tessuto, on 11th, December 2014 with no Comments in News Stampa 3D - <http://stampalo3d.it/2014/12/11/un-vestito-stampato-in-3d-elastico-come-il-tessuto/>

Buffagni T., Il futuro della moda? Stampare in 3D i propri vestiti -

18 novembre 2014 - <http://www.stampa3d-forum.it/moda-vestiti-stampa-3d/>
Colleoni C., Dal progetto alla realizzazione: ottimizzati soluzioni e Tempi, 10/2011 - www.edilizianews.it/articolo/54/dal-progetto-alla-realizzazione-ottimizzati-soluzioni-e-tempi

Lamanna Cesare, *Cos'è il responsive design*, maggio 2012

<http://www.html.it/pag/32821/cose-il-responsive-design/>

Dizionario italiano, definizione iconico

http://dizionari.corriere.it/dizionario_italiano/I/iconico.shtml

Vocabolario online, definizione iconico

<http://www.treccani.it/vocabolario/iconico/>

Emi, Peter Cook & Colin Fournier - Kunsthaus- Graz(Austria), 2007

<http://architetturaeffimera.blogspot.it/2007/10/peter-cook-colin-fournier-kunsthaus.html>

Brizzi Marco, Tecnologia, Kas Oosterhuis, tratto da ARCH'IT” Kas Oosterhuis.

Il lato selvaggio dell'architettura”, 1999

<http://www.arc1.uniroma1.it/saggio/conferenze/Civita/CellnoNet/ricerca/ricerca.htm>

Wikipedia, L'enciclopedia libera, Problema di ottimizzazione,

http://it.wikipedia.org/wiki/Problema_di_ottimizzazione

Fonti delle immagini

Tutte le immagini, foto e disegni, non riportati all'interno di questo elenco sono state realizzate dall'autore della presente tesi.

CAPITOLO PRIMO

- 1.1 - <http://www.archilab.org/public/2000/catalog/novak/novak06.htm>
1.2,3,4 - <http://www.arch.rpi.edu/2011/10/oksiuta-zbigniew/>
1.5,6,7,8,9 - <http://theverymany.com/>
1.10,11,12,13,14,18,19,20 - <http://www.achimmenges.net>
1.15,16,17 - <http://www.materialecology.com/>
1.21,22 - <http://www.rvtr.com/research/resonant-chamber/>
1.23,4.90 - M. Ciammaichella, *Processi di sviluppo delle superfici - Architettura e moda a confronto*, in Geometria Descrittiva e Rappresentazione Digitale - Memoria e Innovazione – volume secondo, a cura di Andrea Casale, Edizioni Kappa, luglio 2013, p.189
1.24 - A. Nebuloni, M. Romero, G. Vignati, Alberto Gicopelli, Antonio La Marca, *Responsive Morphologies*, Politecnico di Milano, 22 settembre 2014
1.25 - <http://www.iljournal.it/2011/nuovo-museo-dali-dalla-catalogna-alla-florida/206388>
1.28 - <http://www.archiportale.com/news/2011/01/architettura/tbilisi-il-pon-te-della-pace-di-michele-de-lucchi>
1.33,34,35 - <http://www.e-architect.co.uk/france/windshape>
1.29,30 - Aldo Aymonino, Valerio Paolo Mosco, *Spazi pubblici contemporanei. Architettura a volume zero*, Skira, 2006, p.45-45
1.31, 32 - <http://www.arch2o.com/kunsthau-graz-peter-cook-and-colin-four-nier/>,
1.36,37,38,39 - M Capone, Geometria per l'Architettura, pp. 16-17
1.35 – M. Savorra, La forma e la struttura. Felix Candela, gli scritti, Electa, 2013
1.40 - R. Buckminster Fuller, Inventor, Designer, Architect, Theorist (1895-1983) - <http://design.designmuseum.org/design/r-buckminster-fuller>
1.41 – U. De Plaisant, *Il Disegno come strumento scientifico autonomo*, Seminari del corso di disegno, a cura di II Università degli studi di Roma, Facoltà di Ingegneria, 1982-87, p. 179

CAPITOLO TERZO

- 3.4 – A. Palladio, *I quattro libri dell'architettura*, 1970
3.5 – <http://design.designmuseum.org/design/r-buckminster-fuller>
3.6 - http://en.wikipedia.org/wiki/Lord's_Media_Centre
3.7 - A.Tedschi, *AAD_Algorithms aided design, parametric strategies using Grasshopper*, Le Penseur Publisher, 2014

CAPITOLO QUARTO

- 4.5, 6 - <https://it.pinterest.com/nethmorgan/mosaic-gaudi/>
4.10,15 – <http://www.achimmenges.net>
4.11 - <http://matsysdesign.com/category/projects/shell-star-pavilion/>
4.12 - <http://cargocollective.com/alvarosoto/Blime-Light>
4.19 - <http://matsysdesign.com/2012/04/13/catalyst-hexshell/>
4.22,23 - J. Raynaud, Smooth free form glass skin, in Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference
a cura di Christian Louter,Freek Bos,Jan Belis,Jean-Paul Lebet, CRC Press, 2014, p.59
4.24,44 - A. Shiftner, N. Leduc, P. Bompas, N. Baldassini, M. Eigensatz, *Architectural Geometry from Research to Practice: The Eiffel Tower Pavilions*, in Advances in Architectural Geometry 2012, a cura di Hesselgren, Sharma, Wallner, Baldassini, Bompas, Raynaud, 2012, pp. 223
4.25, 4.26 - J. Glymph, D. Shelden, C. Ceccato, J. Mussel, H. Schober, *A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets*, in Automation in Construction 13 (2004), pp.197-199
4.29 – E. E. Viollet Le Duc, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du 11^{me} au 16^{me} siècle*, 1854-68
4.30 – D. Galasso, Villard de Honnecourt, la rivoluzione strutturale del Medioevo, Archigrafica, 2008, p.15
4.31 – L. da Vinci, Manoscritto doppia pagina sul monumento Sforza
4.32 - <http://arx.novosibdom.ru/node/1852>
4.33, 36 - Yuxiao He, Implementing Customized Metal Panels in Architectural Freeform Surfaces, Faculty of Architecure, Graduation Studio 11, Architectural Engineering, Delft University of Technology, 2014, p. 6
4.34 – Paoletti I., Costruire le forme complesse. Innovazione, industrializzazione e trasferimento per il progetto di architettura, Libreria CLUP, Milano, 2006
4.35 - Chanel, Francois Lacour/AP - <http://www.findingdulcinea.com/news/entertainment/September-October-08/Chanel-Art-Installation--Bags--Central-Park.html>
4.38 - Sigrid Brell-Cokcan, Johannes Braumann, A New Parametric Design Tool

for Robot Milling, ACADIA 2010, p.2

4.42 – E. Biondi, Quando l'architettura nasce da una goccia d'acqua. Le strutture Blob, Tesi di Laurea, relatore S. Invernizzi, Politecnico di Torino

4.44 - B. Vaudeville, M. King, S. Aubry, J. Raynaud, M. Chalaux, A. Witt, *How Irregular Geometry and Industrial Process Come Together: A Case Study of the "Fondation Louis Vuitton Pour la Creation"*, Paris, in Advances in Architectural Geometry 2012, pp. 283-284

4.45 – N. Leduc, J. Raynaud, N. Baldassini, *Project for the Eiffel Tower: Constructive Geometry*, in Bas, Louter, Nijse, Challenging Glass 3 - Conference on Architectural and structural applications of glass, IOS Press, 2012, p. 96

4.46, 47 – Pottman H., *Chapter 15: Developable surfaces and unfoldings*, in *Architectural Geometry*, p.560

4.48 - H. Pottmann, A. Schiftner, P. Bo, H. Schmiedhofer, W. Wang, N. Baldassini, J. Wallner, *Freeform surfaces from single curved panels*, p. 7

4.49,50,51,52 - L. Ghang, K. Seonwoo, Case Study of Mass Customization of Double-Curved Metal Façade Panels Using a New Hybrid Sheet Metal Processing Technique - 1322 / Journal of construction Engineering and management © ASCE / November 2012

4.53,54 - A. Pronk, I. van Rooy and P. Schinke, *Double-curved surfaces using a membrane mould*, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Valencia, 2009

4.55

4.60 - Raynaud J., *Smooth free form glass skin*, in Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference

a cura di Christian Louter,Freek Bos,Jan Belis,Jean-Paul Lebet, CRC Press,2014

4.61-http://www.architetto.info/il-dongdaemun-design-plaza-di-zaha-hadid-e-l-uso-innovativo-del-bim_strumenti_x_12850.html

4.62 – I.Paoletti, S. Converso, *Da Gehry... in Avanti* - http://ftp2.bentley.com/dist/collateral/docs/press/Da-Gehry-in-Avanti_Modulo_IT.pdf, p.513

4.63 – http://aasarchitecture.com/2014/04/new-photo-dongdaemun-design-plaza-by-zah-hadid.html/dongdaemun-design-plaza-by-zaha-hadid02

4.64 - http://archaddict.com/seouls-dongdaemun-design-plaza-by-zaha-hadid

4.65 - M. Eigensatz, A. Schiftner, M. Kilian, G. Chinzi, *Large scale double curved glass façades made feasible — The Arena Corinthians West Façade*, Sao Paulo, in Glass Performance Days 2013, pp. 525, 526

4.66,67

4.73,74,75,76 – C. Colleoni, *Dal progetto alla realizzazione: ottimizzati soluzioni e tempi*, (4 ottobre 2011) – www.edilizianews.it/articolo/54/dal-progetto-alla-realizzazione-ottimizzati-soluzioni-e-tempi

4.77 - http://www.archipanic.com/woodskin/

4.80 -

4.81 -

4.82 - http://commons.wikimedia.org/wiki/File:US_Air_Force_Academy_Chapel.JPG

4.83 - https://secure.arch.virginia.edu/groups/communiwiki/wiki/13031/Folding.html

4.84,85,95,96 - P.H. J. Zimmer, *Optimization of 3D Models for Fabrication*, Diplom-Informatiker, 2014, p.58

4.86 - http://www.officina-artec.com/category/publications/

4.88,89 – *IT Systems in constructions. Analysis and reflections* - https://ahsanrehman25.wordpress.com/2013/10/15/r-hanlen-f-soliman-bim-coordination-technologies-week-6/

4.91 – A. Walker, *WoodenDress - Materials & Wearables*: “WoodenDress”- http://alliwalk.com/wooden_dress.html

4.92 – Kinematics (26 novembre 2013) - http://n-e-r-v-o-u-s.com/blog/?p=4467

4.93 - *Wooden Textile Dress – Léa Peckre & Elisa Strozyk* (21 gennaio 2013) http://www.wmnetwork.fr/wooden-textile-dress-lea-peckre-elisa-strozyk/

Riferimenti schede casi campione

A1 - www.freeformstructures.com - www.arthitectural.com - www.studiovass.com

A2 - www.freeformstructures.com - www.infobuild.it1

A3 - http://www.filmvz.com/budapest/budapest-metro-line-bikas-park-station.htm

B1 - http://matsysdesign.com/

B2 - http://matsysdesign.com/

B3 - www.en.wikipedia.org - www.circlingsquares.blogspot.it - www.supermodulor.com - www.science.howstuffworks.com - www.projects.exeter.ac.uk

C1 - http://www.sbp.de/en/build/show/97-House_for_Hippopotamus,_Zoo_Berlin - J. Glymph, D. Shelden, C. Ceccato, J. Mussel, H. Schober, *A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets*, in Automation in Construction 13 (2004)

C2 - http://www.arch2o.com/fondation-louis-vuitton-by-frank-gehry-takes-shape-in-paris/ - B. Vaudeville, M. King, S. Aubry, J. Raynaud, M. Chalaux, A. Witt, *How Irregular Geometry and Industrial Process Come Together: A Case Study of the "Fondation Louis Vuitton Pour la Creation"*, Paris, in Advances in Architectural Geometry 2012

C3 - [http://www.e-architect.co.uk/france/the-turbulences-frac-centre -](http://www.e-architect.co.uk/france/the-turbulences-frac-centre-)
www.frac-centre.fr

C4 - <http://www.skyscrapercity.com/> - [www.ticketline.co.uk/venue/sage-gate-](http://www.ticketline.co.uk/venue/sage-gate-head)
[thead - http://www.tonyjollyimages.com/sage-gateshead.shtml](http://www.tonyjollyimages.com/sage-gateshead.shtml)

CAPITOLO QUINTO

5.1, 2, 3,4,5,6,7 - Azimut|h

5.8 – <https://www.math.hmc.edu/~jacobsen/demolab/chladniplate.html>

5.17 - Issa R., *Essential Mathematics for Computenational Design*, Robert McNeele & Associates, 2009

5.30, 31, 32 - *Types of Riemann/Gauss Curvature*, 2013 , pp. 6-8, <http://www.the-physicsmill.com/2013/03/17/for-there-we-are-captured-the-geometry-of-spacetime/>

5.37, 38 - Stavric M., Wiltsche A., Freissling C., *Discretization of free-form surfaces by plane elements derived from tangent planes*, in Glass Performance Days 2011 - www.gpd.fi, p.2

CAPITOLO SESTO

6.9,10,11 - F. Fantini, *Superfici poligonali*, in Riccardo Migliari, Geometria Descrittiva – Volume II – Tecniche e Applicazioni, Città Studi Edizioni, Novara, 2009, p.71,74

6.12,71 - A. Schiftner, *Planar quad meshes from relative principal curvature lines*, Diploma Thesis, supervised by o. Univ-Prof. Dr. Helmut Pottman, Institute of Discrete Mathematics and Geometry Vienna University of Technology, p. 18, 41

6.28 - A Tedeschi, *AAD_Algorithms aided design* . L'immagine è una rielaborazione dell'autore della presente tesi.

6.46 - [http://www.atriumgallery.net/buckminster-fuller/](http://www atriumgallery.net/buckminster-fuller/)

6.45 - Rossi M., *Realtà e immaginazione: nuove forme e antiche simmetrie*, in Disegnare, n.38, Gangemi Editore, p.36

6.47 - <http://bobwb.tripod.com/synergetics/bucky/fig15.html>

6.54,87 - Guida del plug-in Evolute Tools Pro

6.55,56,78a,b,c – H. Pottmann, Y. Liu, J. Wallner, A. Bobenko, W. Wang, *Geometry of Multi-layer Freeform Structures for Architecture*, in ACM Trans. Graphics, Vol 26, n.3, 2007

6.65,66,67 - <http://www.achimmenges.net>

6.80 – L. Baglioni, *Nuove applicazioni della geometria descrittiva: le PQ mesh nell'architettura contemporanea*, in Disegnare con, 9 giugno 2012, p.272

6.85

6.86,89 - M. Eigensatz, A. Schiftner, *Paneling the Eiffel Tower Pavilions, in Case Studies in Optimization of Glass-panelized Architectural Freeform Designs for the Eiffel Tower Pavilions*, Glass Performance Days Proceedings, (2011)
www.glassonweb.com/articles/article/765/

CAPITOLO SETTIMO

7.1a,b,c - *A century of history for the 1st floor* - www.eiffel-tower.com/en/redevelopment-of-the-1st-floor/a-century-of-history-for-the-1st-floor.html, p.3

Le immagini 7.2,5,7,14,29,30,31 © Moatti-Rivière architectes e 7.10a,b © Stefan Brion sono state gentilmente fornite dall'arch. Alain Moatti (Moatti-Rivière agence)

7.6,7.7 -

7.22-1,2,3 (le immagini sono state rielaborate dall'autore della tesi),7.25,26,27,28 - M. Eigensatz, A. Schiftner, *Paneling the Eiffel Tower Pavilions*, in Case Studies in Optimization of Glass-panelized Architectural Freeform Designs for the Eiffel Tower Pavilions, Glass Performance Days Proceedings, (2011)-www.glassonweb.com/articles/article/765/

7.32 - Nicolas Leduc, Jacques Raynaud, Niccolo Baldassini, *Project for the Eiffel Tower: Constructive Geometry* in Bos, Louter, Nijssse, Challenging Glass 3 - Conference on Architectural and structural applications of glass, IOS Press, 2012, p. 98-99

7.36

Tutti i modelli e i disegni sono stati elaborati dall'autore della presente tesi.

CAPITOLO OTTAVO

Le seguenti immagini sono state gentilmente fornite dall'arch. Amleto Picerno Ceraso (co-tutor della presente tesi):

8.34,35,36a,b,c,37d,e,f,40,43 © Mediterranean FabLab + Co-de-iT + PicernoCerasoLab + Tekla

Il modello del *Cocoon Evo Pavilion* è stato fornito dall'arch. Amleto Picerno Ceraso
8.12 - La definizione per il *gravity test* è stato fornito dall'arch.Andrea Graziano nell'ambito del workshop.

Tutti i disegni sono stati elaborati dall'autore della presente tesi.

CAPITOLO NONO

9.1,2

9.24 a, b

9.7,8,9,10 - *Heinz Isler: A few important things* - <http://blog.buildllc.com/2009/04/heinz-isler-a-few-important-things/>

9.11,12 – T. Maurer, E. O’Grady, E. Tung, *Inverse hanging membrane: the Nathurtheater Grötzingen*, in Evolution of german shells, Efficiency in form - <http://shells.princeton.edu/Grotz.html>

9.22 - M. Eigensatz, A. Schiftner, *Paneling the Eiffel Tower Pavilions*, in Case Studies in Optimization of Glass-panelized Architectural Freeform Designs for the Eiffel Tower Pavilions, Glass Performance Days Proceedings, (2011)-www.glassonweb.com/articles/article/765/

9.24a,b - *Modelli per la geometria non euclidea*, ©1999,2007 Paolo Lazarini - p.lazarini@tin.it

9.14,27,28 - Elaborati realizzati in collaborazione con gli studenti del corso di Applicazioni di Geometria Descrittiva, docente responsabile del corso: prof.ssa Mara Capone; collaboratrice: Emanuela Lanzara.

9.33 - <http://blog.archpaper.com/2012/09/la-voute-de-lefevre-a-study-in-stereotomy/>

9.34 - <http://www.andrew.cmu.edu/user/mzh/projects/hex.html>

9.31-32,35,36-http://block.arch.ethz.ch/brg/files/IABSE-IASS2011_Rippmann-Block.pdf, p.7



Emanuela Lanzara si laurea nel 2010, con lode, in Architettura presso l’Università degli Studi di Napoli Federico II con una tesi in Applicazioni di Geometria Descrittiva dal titolo *Geometrie Free Form: dalla modellazione alla realtà*, relatore prof. arch. Mara Capone. Dal 2011 è cultrice della materia nel settore delle discipline della Rappresentazione del Dipartimento di Architettura di Napoli.

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II - DIPARTIMENTO DI

RICERCA IN TECNOLOGIA DELL'ARCHITETTURA E RILIEVO E RAPPRESENTAZIONE

Università degli Studi di Napoli Federico II
Dipartimento di Architettura
Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell’Architettura
e Rilievo e Rappresentazione
dell’Architettura e dell’Ambiente ciclo XXVII

Coordinatore del Dottorato Mario Rosario Losasso
Coordinatore d’indirizzo Riccardo Florio

Collegio dei docenti

Paola Ascione	Valeria D’Ambrosio
Erminia Attaianese	Antonella di Luggo
Laura Bellia	Antonella Falotico
Mariangela Bellomo	Riccardo Florio
Jean François Cabestan	Dora Francese
Massimiliano Campi	Mario Losasso
Mara Capone	Francesco Maglioccola
Raffaele Catuogno	Alessandra Pagliano
Umberto Caturano	Antonio Passaro
Alessandro Claudi de St. Mihiel	Sergio Pone
Claudio Claudi de St. Mihiel	Marina Rigillo
Alberto Coppola	Sergio Russo Ermolli

